

# Transformación de 1-penteno sobre tamices moleculares aluminofosfatos con estructura AEL

*Elvis González, Yajaira Guillén y Carmen Milena López\**

*Centro de Catálisis, Petróleo y Petroquímica, Escuela de Química, Facultad de Ciencias,  
Universidad Central de Venezuela, Apartado 47102, Caracas 1020-A, Venezuela*

Recibido: 01-03-06 Aceptado: 12-07-06

## Resumen

Se prepararon y evaluaron en la transformación de 1-penteno, una serie de tamices moleculares tipo aluminofosfatos con estructura AEL y fracción molar de silicio entre 0 ( $\text{AlPO}_4$ -11) y 0.13 (SAPO-11). Al incrementar el contenido de silicio, la acidez total por gramo de sólido determinada por TPD de  $\text{NH}_3$  también incrementa, sin un aumento significativo en la temperatura del máximo de desorción. Sobre  $\text{AlPO}_4$ -11, un material con sitios ácidos muy débiles, el rendimiento a isomerización esquelética fue solo de 5% molar a 300°C, incrementando hasta 30% a 500°C. Sobre los sólidos con silicio (SAPO-11), la isomerización de 1-penteno es la reacción principal entre 300 y 500°C, las reacciones colaterales de craqueo y oligomerización se dan en poca extensión, obteniendo un alto rendimiento a iso-pentenos (68-60%) con una buena aproximación al equilibrio termodinámico. En el intervalo estudiado para las composiciones SAPO, el contenido de silicio y la velocidad espacial no afectan apreciablemente el comportamiento catalítico del sólido. Los resultados catalíticos indican la participación de sitios ácidos Brønsted en la isomerización esquelética de 1-penteno.

**Palabras clave:** 1-penteno; AEL; SAPO-11; isomerización esquelética.

## The transformation of 1-pentene over molecular sieves aluminophosphates with AEL topology

### Abstract

A series of molecular sieves having the AEL topology with silicon content varying from 0 ( $\text{AlPO}_4$ -11) to 0.13 (SAPO-11) molar fraction, were synthesized and evaluated in the transformation of 1-pentene. As the silicon content increases, the total acidity per gram of solid, as determined by  $\text{NH}_3$ -TPD also increases, however, the temperature of desorption stays constant. Over  $\text{AlPO}_4$ -11, a material with very weak acid sites, the yield to skeletal isomerization was only 5% at 300°C, increasing until 30% at 500°C. On SAPO-11 solids, isomerization of 1-pentene is the main reaction, side reactions are negligible and a high yield to iso-pentenes (68-60%) with a good approach to the equilibrium is observed. For SAPO compositions, the silicon content and the space velocity did not affect appreciably the catalytic behaviour. The results indicate the participation of Brønsted acid sites in the skeletal isomerization of 1-pentene.

**Key words:** 1-pentene; AEL; SAPO-11; skeletal isomerization.

\* Autor para la correspondencia. E-mail: cmlopez@strix.ciens.ucv.ve

## Introducción

Los nuevos requerimientos para las gasolinas incluyen la reducción de compuestos volátiles, particularmente hidrocarburos de cadena corta  $C_4$  y  $C_5$ . Las metas mundiales en este campo son la reducción de las emisiones y una combustión más completa de la gasolina. Para este propósito, los oxigenados y las parafinas altamente ramificadas, tales como las componentes de los alquilatos, juegan un papel importante como componentes de las gasolinas. La isomerización esqueletal de *n*-alquenos es una reacción importante para mejorar corrientes de refinerías, ya que produce el material de partida para las reacciones de alquilación. La isomerización esqueletal de 1-buteno a iso-buteno y de 1-penteno a iso-pentenos son tópicos importantes (1-6) debido a que las iso-olefinas son materiales deseados para la producción de alquilatos y para éteres como el TAME (ter amil metil eter).

Los tamices moleculares silicoaluminofosfatos reportados por primera vez por Lok y colaboradores (7), han mostrado propiedades interesantes para las reacciones de transformación de hidrocarburos catalizadas por ácidos, particularmente para la isomerización esqueletal de 1-buteno (8-12).

Maurer y Kraushaar-Czarnetzki (13) estudiaron la isomerización de 1-penteno sobre catalizadores ZSM-5. A bajas temperaturas ( $<300^\circ\text{C}$ ), solo observaron la isomerización de doble enlace, para mayor temperatura obtuvieron una mezcla de pentenos en equilibrio incluyendo los isómeros ramificados, además observaron la formación de productos de dimerización y craqueo. La isomerización de 1-penteno fue estudiada por Föttinger y colaboradores (14) sobre zeolitas ferrierita (FER) y beta (BEA). Sobre BEA, la isomerización esqueletal estuvo acompañada por reacciones de dimerización, craqueo, transferencia de hidrógeno y formación de coque. Por el contrario, sobre FER las reacciones co-laterales fueron despreciables y se observó una alta selectividad a la formación de iso-pentenos.

Los tamices moleculares aluminofosfato con silicio (SAPO) y con metales (MeAPO), con estructuras AEL y AFI, han sido usados para la

isomerización de 1-penteno (15-16). Los sólidos SAPO-11 y CoAPO-11 mostraron una alta selectividad hacia la isomerización esqueletal con una baja desactivación, mientras que los de estructura AFI se desactivaron rápidamente.

En este trabajo se reportan los resultados sobre la isomerización de 1-penteno usando catalizadores con estructura AEL y contenido de silicio variable, con el objetivo de establecer el efecto del contenido de silicio en el sólido y las condiciones de reacción sobre el rendimiento a iso-pentenos.

## Parte Experimental

### Preparación y caracterización de los catalizadores

El procedimiento de síntesis para la preparación de los catalizadores sin silicio ( $\text{AlPO}_4$ -11) y con silicio (SAPO-11) han sido reportados en trabajos anteriores (17-18). Se utilizaron los siguientes materiales de partida: hidróxido de aluminio (54% en peso  $\text{Al}_2\text{O}_3$  de Aldrich); ácido fosfórico 85% en peso de Aldrich; di-*n*-propilamina (DPA) de Aldrich; solución de sílice coloidal 40% en peso (Ludox AS 40) de Dupont y agua destilada. El gel de síntesis fue preparado añadiendo la fuente de alúmina a una solución diluida de ácido fosfórico, luego la amina y finalmente la fuente de silicio, todo esto a temperatura ambiente y con agitación. La composición molar del gel de partida fue  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{P}_2\text{O}_5:\text{DPA}:50\text{H}_2\text{O}:\text{xSiO}_2$ , con *x* entre 0 y 0.6. La cristalización se realizó a  $200^\circ\text{C}$  por un periodo de 24 h. El producto sólido recuperado por centrifugación fue lavado con agua destilada y secado a  $100^\circ\text{C}$ . Para remover la amina, el sólido fue calcinado en corriente de aire a  $500^\circ\text{C}$  a razón de  $2^\circ\text{C}/\text{min}$  por 15 h.

Los difractogramas de rayos X fueron obtenidos en un equipo Philips PW 3710 usando radiación  $\text{Cu } \alpha$  operado a 30 kV y 20 mA, con una velocidad de barrido de  $2^\circ 2\theta/\text{min}$ . Las líneas de difracción entre  $8$  y  $25^\circ 2\theta/\text{min}$  fueron tomadas para determinar el grado de cristalinidad. El análisis químico de los sólidos calcinados fue realizado por espectroscopia de emisión atómica con una fuente de plasma inductivamente acoplado. El área superficial específica (ASE) fue ob-

tenida en un equipo Micromeritics 2200 empleando N<sub>2</sub> como adsorbato a la temperatura del nitrógeno líquido.

Los análisis de desorción de NH<sub>3</sub> a temperatura programada fueron realizados en un equipo Micromeritics 2900 TPD/TPR. Las muestras fueron pre tratadas bajo un flujo de N<sub>2</sub> seco calentando hasta 240°C a razón de 2°C/min. Después de 30 min a 240°C, la temperatura fue incrementada hasta 540°C a una velocidad de 5°C/min, manteniendo esta temperatura final por 1 h. Luego la muestra fue enfriada a 180°C, haciendo pasar pulsos de NH<sub>3</sub> con He como gas portador. Después de saturar la muestra, el NH<sub>3</sub> quimisorbido fue desorbido desde 180°C a 500°C aumentando la temperatura a una velocidad de 10°C/min y manteniendo la temperatura final por 15 minutos.

Los experimentos de FTIR de la interacción de piridina con el sólido fueron realizados en un equipo Perkin Elmer 1760-X. La intensidad de las bandas a 1550 (I<sub>B</sub>) y 1450 (I<sub>L</sub>), medidas después de la desgasificación a una temperatura determinada, fueron tomadas como proporcionales a la concentración de sitios ácidos Brønsted y Lewis, respectivamente. Para los propósitos de este trabajo, se definieron tres intervalos distintos de fuerza ácida: acidez total, relacionada a los sitios que retienen piridina a 170°C; acidez moderada y fuerte, adscrita a los sitios que retienen piridina a 350°C y acidez fuerte asociada con los sitios que retienen piridina a 500°C.

### Actividad catalítica

La conversión catalítica de 1-penteno fue realizada a presión atmosférica en un sistema de flujo continuo con reactor de lecho fijo, en un intervalo de temperatura de 300 a 500°C. El gas de entrada al reactor consistió de una mezcla de N<sub>2</sub> (15 cm<sup>3</sup>/min) con una presión parcial de 1-penteno de 0.31 atm. Para alcanzar esta presión, el nitrógeno fue pasado a través de un recipiente de vidrio (saturador) con penteno, sumergido en un baño de hielo a 0°C. Para las pruebas se utilizó un gramo de catalizador, lo cual implica una velocidad espacial horaria en peso (VEHP) de 1,32 h. Antes de la prueba, el catalizador fue activado por un flujo de nitrógeno de 30 cm<sup>3</sup>/min durante

2 h a 500°C. El análisis de los productos de la reacción fue realizado en un cromatógrafo de gases HP 5890A conectado en línea con el reactor. El cromatógrafo está equipado con un detector de ionización de llama y una columna capilar de sílice fundida KCl/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

La conversión total de 1-penteno (X) fue calculada de acuerdo a la ecuación [1]

$$X = \frac{\sum A_i - A_{1-penteno}}{\sum A_i} \times 100 \quad [1]$$

donde A<sub>i</sub> es el área cromatografica corregida para cada compuesto.

Para un producto de reacción, o un conjunto de productos, el rendimiento (Y) es definido por la ecuación [2].

$$Y_p = \frac{A_p}{\sum A_i} \times 100 \quad [2]$$

La selectividad (S) fue definida de acuerdo a

$$S = \frac{A_p}{\sum A_p - A_{1-penteno}} \times 100 \quad [3]$$

La eficiencia a la isomerización esquelética (EIE) fue determinada en base a la aproximación de la distribución de isómeros ramificados en relación al valor predicho por el equilibrio termodinámico a la temperatura de trabajo, mediante la ecuación:

$$EIE = \left[ \frac{A_{isoC5=}}{A_{isoC5=} + A_{c2p} + A_{t2p}} \right] \left[ \frac{1}{0.825} \right] \times 100 \quad [4]$$

Donde el valor de 0.825 corresponde a la fracción de isopentenos en equilibrio a 300°C (13).

Los productos fueron agrupados para determinar los siguientes rendimientos y selectividades: Y<sub>de</sub> y S<sub>de</sub> = formación de cis-2-penteno (c2P) y trans-2-penteno (t2P); Y<sub>isoC5=</sub> y S<sub>isoC5=</sub> = formación de isopentenos: 2-metil-1-buteno (2M1B), 2-metil-2-buteno (2M2B) y 3-metil-1-buteno (3M1B); Y<sub><C5</sub> y S<sub><C5</sub> = formación de produc-

tos C<sub>1</sub> a C<sub>4</sub>; y Y<sub>C5sat</sub> y S<sub>C5sat</sub> = formación de C5 saturados, n-pentano e isopentano. Los productos que contienen mas de 5 átomos de carbono (Y<sub>>C5</sub>; S<sub>>C5</sub>) fueron menos de 3% molar de la distribución de productos.

## Resultados y discusión

### Preparación y caracterización de los catalizadores

Todas las preparaciones de AlPO<sub>4</sub>-11 y SAPO-11 mostraron un patrón de DRX correspondiente al de la estructura AEL (17, 19). El difractograma de rayos X del SAPO-11(0.6), tomado como referencia para el cálculo del porcentaje de cristalinidad (% Crist), se muestra en la Figura 1. En la Tabla 1 se muestran las principales características de los sólidos calcinados. El número entre paréntesis para los SAPO-11 representa el valor de x en el gel de síntesis. Los resultados del análisis químico expresado como formulas TO<sub>2</sub> muestran que el contenido de silicio en el sólido incrementa con el contenido de silicio en el gel de partida. Todas las preparaciones de SAPO-11 mostraron una alta cristalinidad y valores de ASE de acuerdo con los reportados para esta clase de sólidos (15-20). La muestra AlPO<sub>4</sub>-11 exhibe la más baja cristalinidad y ASE. Probablemente, algo de material extra estructural o material remanente de la síntesis, no detectado por DRX, puede estar presentes en los canales del sólido.

La acidez total, expresada como mmol de NH<sub>3</sub> por gramo de catalizador y determinada por TPD de NH<sub>3</sub> entre 180 y 500°C, incrementa con el contenido de silicio, tal como se puede apreciar en la Tabla 2. Para la composición AlPO<sub>4</sub>-11 no se detectó acidez, y para las composiciones SAPO-11 el máximo del pico de desorción se ubicó en 240°C, indicando una fuerza de acidez principalmente media.

Los experimentos de adsorción de piridina seguida por infrarrojo también muestran un incremento en la acidez total al aumentar la carga de silicio en el sólido, tal como se muestra en la Tabla 2. Particularmente se nota un incremento en los sitios ácidos fuertes para SAPO-11(0,6). El sólido AlPO<sub>4</sub>-11 mostró una baja acidez Bröns-

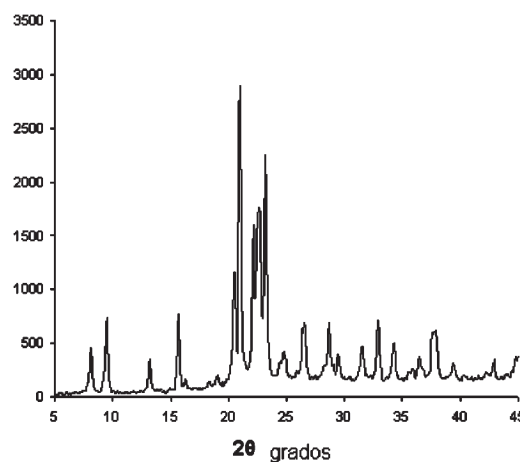


Figura 1. Patrón de DRX del sólido SAPO-11(0.3) sintetizado.

Tabla 1  
Algunas características de los sólidos estudiados

Muestra	(% Crist) <sub>DRX</sub>	ASE (m <sup>2</sup> /g)	Composición molar, Fórmula TO <sub>2</sub>
AlPO <sub>4</sub> -11	97	96	(Al <sub>0.548</sub> P <sub>0.452</sub> )O <sub>2</sub>
SAPO-11 (0,3)	100	166	(Al <sub>0.506</sub> P <sub>0.430</sub> Si <sub>0.064</sub> )O <sub>2</sub>
SAPO-11 (0,6)	99	159	(Al <sub>0.475</sub> P <sub>0.397</sub> Si <sub>0.126</sub> )O <sub>2</sub>

ted, clasificada como débil ya que la banda desaparece cuando se calienta a 350°C. Esta acidez ha sido atribuida a grupos P-OH y Al-OH terminales originados por defectos estructurales. La presencia de sitios ácidos Lewis soporta la idea de rompimiento estructural después de la calcinación, produciendo átomos de Al deficientes de electrones (21).

### Pruebas catalíticas

El tiempo de uso de 3 horas empleado en las pruebas catalíticas no tuvo un efecto marcado en la conversión de 1-penteno. En la Tabla 3 se muestra un resumen de los resultados de las pruebas a 300°C. Como se puede ver, la conversión total de 1-penteno tiene un cierto aumento al incorporar silicio en el sólido. A pesar de que la

Tabla 2  
Propiedades de acidez de los sólidos estudiados

Sólido	Acidez total TPD de NH <sub>3</sub> mmol NH <sub>3</sub> /g	Acidez Brönsted (mmol/g)			Acidez Lewis (mmol/g)		
		170°C	350°C	500°C	170°C	350°C	500°C
AlPO <sub>4</sub> -11	-	2,0	0	0	2,1	1,2	1,2
SAPO-11 (0,3)	0,124	1,2	0,9	0,9	1,2	1,0	0,36
SAPO-11 (0,6)	0,147	2,1	1,3	1,3	1,7	1,3	0,59

Tabla 3  
Resultados catalíticos para la transformación de 1-penteno a 300°C después de 30 min de reacción.

Muestra	X (%)	S <sub>de</sub>	S <sub>isoC5=</sub>	S <sub>C5sat</sub>	S <sub>&lt;C5</sub>	S <sub>&gt;C5</sub>	EIE
AlPO <sub>4</sub> -11	79	93	6	0.04	0	0.06	7
SAPO-11 (0,3)	97	22	71	1	3	3	85

diferencia en conversión total no es tan acentuada, se observaron fuertes diferencias en la selectividad a isomerización esqueletal entre los sólidos con y sin silicio. Este comportamiento se puede explicar en base a que la isomerización de doble enlace es una reacción fácil que puede ocurrir en las condiciones de reacción usadas, aún sobre sólidos de baja acidez como el AlPO<sub>4</sub>-11, mientras que la isomerización esqueletal requiere una mayor fuerza ácida. La incorporación de silicio en la estructura produce un incremento en la Eficiencia de Isomerización Esqueletal (EIE), que parece estar relacionado con la acidez Brönsted media y fuerte, pero no con la acidez Lewis del mismo tipo, tal como puede ser observado en la Figura 2. Esta observación indica que los sitios Lewis no pueden por si solos actuar como centros activos para la isomerización esqueletal. Sin embargo, se debe aceptar que en el sólido AlPO<sub>4</sub>-11 existen unos pocos sitios ácidos (probablemente Brönsted) que pueden catalizar la

isomerización esqueletal, para explicar la observación experimental. Vale notar en este punto que en las pruebas realizadas sin catalizador no se observó la formación de isopentenos.

En las Figuras 3 a 5 se muestra la conversión total de 1-penteno y los rendimientos a los diferentes productos, o grupo de productos, como una función de la temperatura de reacción para los catalizadores, evaluados bajo iguales condiciones de reacción.

Con AlPO<sub>4</sub>-11 (Figura 3) se obtuvo un ligero incremento de la conversión total de 1-penteno con la temperatura. Sin embargo, se observa una variación considerable de los rendimientos o conversiones parciales hacia los isómeros de doble enlace (Y<sub>de</sub>) y hacia los isómeros ramificados (Y<sub>isoC5=</sub>). A mayor temperatura, Y<sub>de</sub> decrece mientras Y<sub>isoC5=</sub> aumenta. La reacción más difícil, que es la isomerización esqueletal, se favorece a mayor temperatura, debido a su mayor energía de activa-



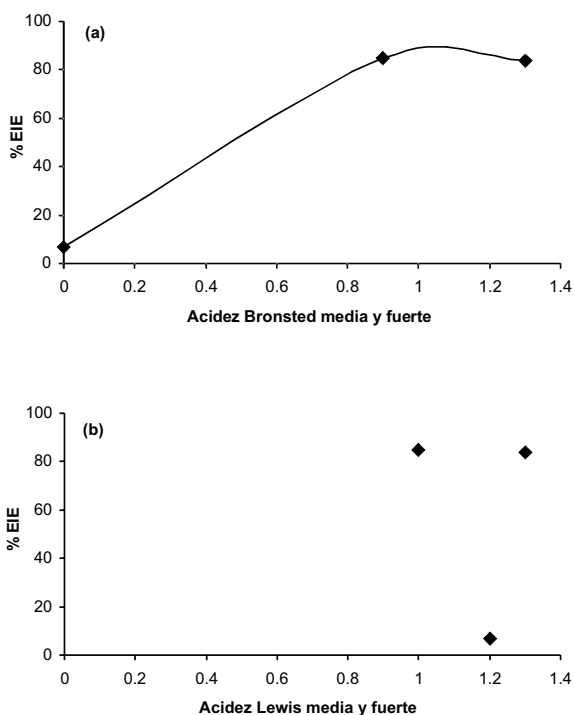


Figura 2. Correlación entre la eficiencia de isomerización esqueletal (EIE): (a) con la acidez Brønsted media y fuerte; (b) con la acidez Lewis

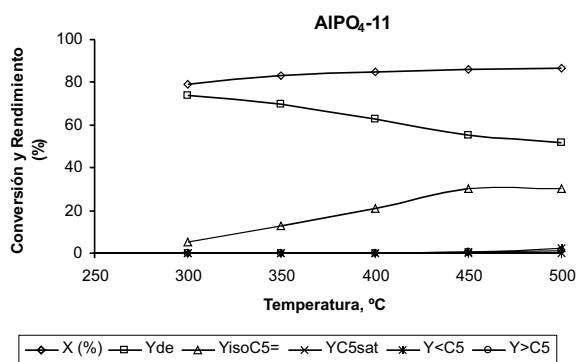


Figura 3. Porcentaje de conversión (X) y rendimiento a un producto (Y) como función de la temperatura de reacción sobre AlPO<sub>4</sub>-11 (N<sub>2</sub>/1-penteno = 1.96 molar y

ción. Para SAPO-11(0,3) y SAPO 11(0,6), se obtuvieron resultados similares, como se puede observar en las Figuras 4 y 5. Sin embargo, con SAPO-11(0,3) la selectividad a isomerización esqueletal es algo mayor que la obtenida con SAPO-11(0,6), ya que para este último los productos menores de C<sub>5</sub> son ligeramente mayores, debido probablemente a la mayor proporción de sitios ácidos Brønsted fuertes. Basados en estos resultados, se puede decir que las diferencias de acidez entre los sólidos SAPO-11 no influyen considerablemente en su comportamiento catalítico, al menos, bajo las condiciones de reacción estudiadas. La conversión total de 1-penteno permanece aproximadamente constante con la temperatura de reacción, con alto rendimiento a los productos de isomerización. Es de hacer notar que con el tiempo de uso del catalizador puede ocurrir la desactivación del sólido, la cual estaría compensada con el aumento de la temperatura de reacción.

A diferencia del comportamiento observado para el AlPO<sub>4</sub>-11, con los SAPO-11 se observa un aumento en el rendimiento hacia isómeros de doble enlace y una disminución en el rendimiento hacia los isopentenos. La distribución normalizada de los pentenos obtenida para los sólidos SAPO-11 también es muy similar. En la Figura 6 se muestra la distribución normalizada de los pentenos a 300°C y 500°C para el SAPO-11(0,3), comparada con la composición de equilibrio reportada por Maurer [13]. Como se puede observar en esta figura, se obtiene una mezcla de pentenos con una composición muy similar a la de equilibrio. Para AlPO<sub>4</sub>-11, a 300°C se obtiene principalmente los isómeros lineales cis y trans 2-penteno, a mayor temperatura (500°C) se forman los isómeros ramificados, pero en una proporción diferente a la del equilibrio termodinámico (Figura 7).

De acuerdo al esquema de reacción presentado anteriormente, en las composiciones SAPO-11 que poseen sitios ácidos Brønsted, la isomerización de 1-penteno a los isómeros cis, trans e isopentenos, parece estar controlada termodinámicamente, alcanzando composiciones similares a la del equilibrio. Esto puede explicar la disminución en Y<sub>isoC5=</sub> al aumentar la temperatura,

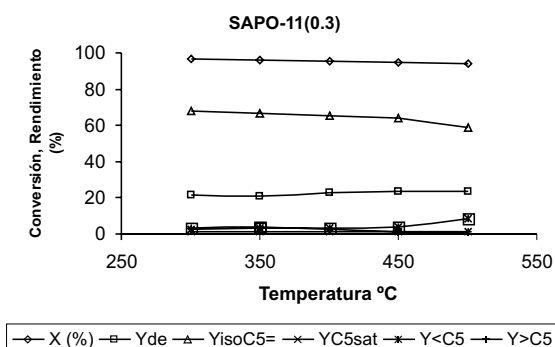


Figura 4. Porcentaje de conversión (X) y rendimiento a un producto (Y) como función de la temperatura de reacción sobre SAPO-11(0,3) ( $N_2/1$ -penteno= 1,96 molar y

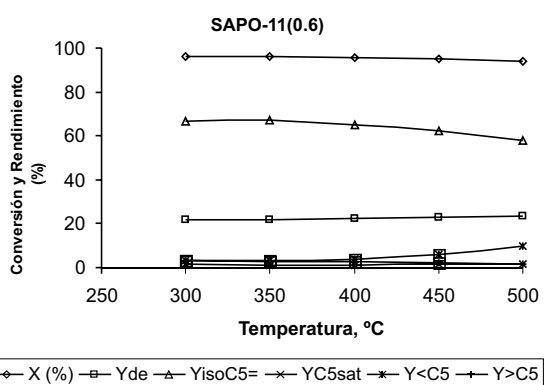


Figura 5. Porcentaje de conversión (X) y rendimiento a un producto (Y) como función de la temperatura de reacción sobre SAPO-11(0,6) ( $N_2/1$ -penteno= 1,96 molar y

ya que esta de acuerdo con los datos de distribución de equilibrio reportados por Maurer (13).

Los sólidos SAPO-11 son altamente selectivos para la isomerización de 1-penteno. Dada la mayor fuerza de los sitios ácidos presentes en los SAPO-11, la isomerización esquelética está favorecida desde 300°C con posible control termodinámico. Las reacciones de transferencia de hidruro para dar  $C_5$  saturados y de dimerización y craqueo para originar productos mayores y me-

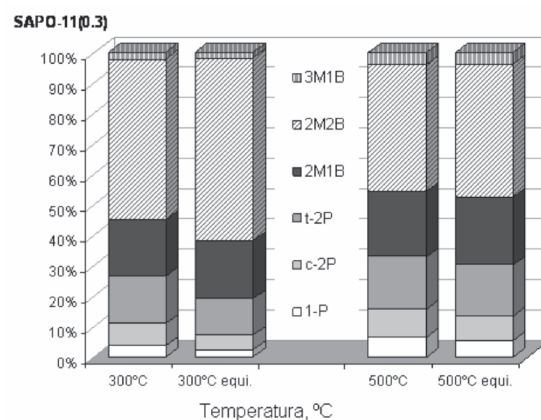


Figura 6. Distribución normalizada de pentenos sobre SAPO-11(0.3) como función de la temperatura de reacción, comparada con el equilibrio termodinámico .

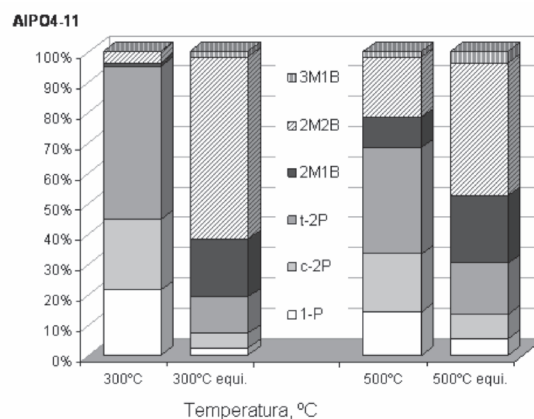


Figura 7. Distribución normalizada de pentenos sobre  $AlPO_4-11$  como función de la temperatura de reacción, comparada con el equilibrio termodinámico .

nores de  $C_5$ , están limitadas. Al aumentar la temperatura, se observa un incremento en los productos menores de  $C_5$  con un correspondiente descenso en los productos mayores de  $C_5$ . Este comportamiento sugiere la formación de los primeros a expensas de los segundos. Es de hacer notar, que aun a 500°C se obtiene un rendimiento

notable hacia los productos de isomerización. Esto explica el buen funcionamiento del catalizador bifuncional Pt/SAPO-11 en la deshidroisomerización de n-pentano reportado en un trabajo anterior (22).

### Efecto de la velocidad espacial y de la relación N<sub>2</sub>/1-penteno:

El efecto de la velocidad espacial fue estudiado para el SAPO-11(0,3) a 300°C y relación N<sub>2</sub>/1-penteno 1,96 molar, variando este parámetro entre 1,31 y 28 h. Al aumentar la velocidad espacial, el rendimiento hacia los isómeros de doble enlace aumenta con un decrecimiento paralelo en el rendimiento hacia los isopentenos, mientras que la conversión total de 1-penteno no se modifica apreciablemente, tal como se puede observar en la Figura 8. Al aumentar la velocidad espacial disminuye el tiempo de contacto, de modo que los isopentenos formados por transformación sucesiva de los isómeros de doble enlace se forman en menor proporción. Esto se ve reflejado en la distribución normalizada de pentenos comparada con la del equilibrio termodinámico mostrada en la Figura 9. Se puede ver que a la mayor velocidad espacial la composición de pentenos tiene la mayor diferencia con la del equilibrio. Sin embargo, hasta 4,35 h no se observan diferencias notables entre la composición obtenida y la de equilibrio, con un 9% de disminución en el rendimiento hacia isopentenos. Este resultado es interesante ya que implica que se puede tratar un mayor volumen de mezcla gaseosa en el reactor manteniendo una conversión hacia isopentenos apreciable con una distribución cercana a la del equilibrio.

Usando una mezcla de hielo y sal fue posible disminuir la temperatura del recipiente que contiene 1-penteno hasta -20°C, logrando una presión parcial de 89 mm de Hg en 1-penteno. De esta forma la relación molar N<sub>2</sub>/1-penteno se incrementó a 6,79 molar. Los resultados catalíticos para el SAPO-11(0,3), obtenidos usando esta relación se comparan en la Figura 10 con aquellos correspondientes a la relación molar de 1,96, a 300°C y a una velocidad espacial de 1,31 h. Como se puede observar en esta figura se obtiene un comportamiento muy similar para ambas condi-

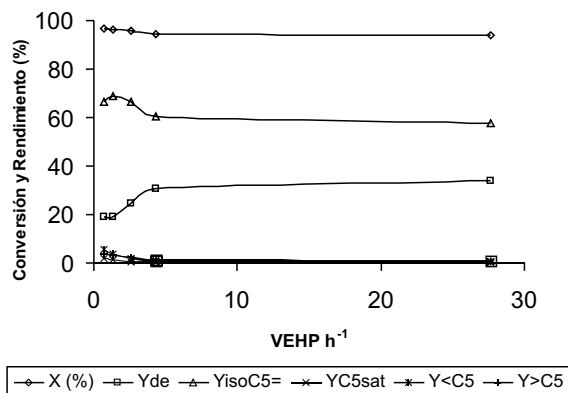


Figura 8. Porcentaje de conversión (X) y rendimiento a un producto (Y) como función de la velocidad espacial VEHP sobre SAPO-11 (0.3) (N<sub>2</sub>/1-penteno= 1,96 molar y temperatura de reacción de

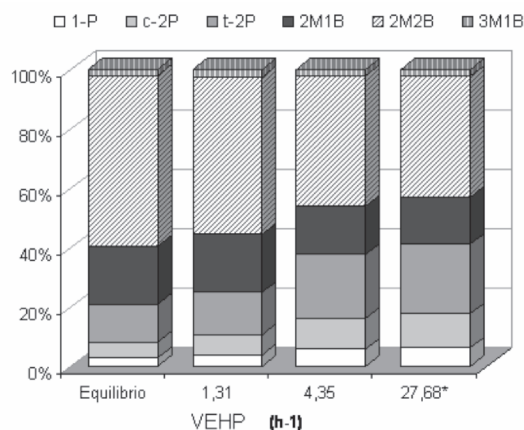


Figura 9. Distribución normalizada de pentenos sobre SAPO-11(0.3) como función de la velocidad espacial, comparada con el equilibrio termodinámico.

ciones. La distribución normalizada de pentenos, en ambos casos es muy similar a la del equilibrio termodinámico. La poca influencia de la concentración de reactivo en las conversiones obtenidas sugiere que la reacción sea de orden cero con respecto a 1-penteno.



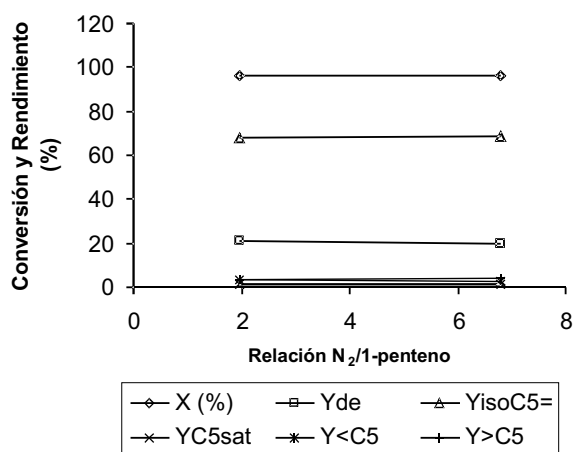


Figura 10 Porcentaje de conversión (X) y rendimiento a un producto (Y) sobre SAPO-11(0,3) como una función de la relación molar

## Conclusiones

Los resultados catalíticos presentados indican que la incorporación de silicio en la estructura AEL origina acidez, produciendo sólidos activos para la isomerización esquelética de 1-penteno. En el rango estudiado, la fracción de silicio incorporada no afecta significativamente el comportamiento catalítico del sólido hacia la reacción estudiada, sin embargo, el sólido con menor contenido de silicio parece el más adecuado para la isomerización esquelética de 1-penteno.

La isomerización de 1-penteno sobre SAPO-11 a 300°C, ocurre con alta selectividad hacia la formación de isopentenos con una distribución cercana a la del equilibrio termodinámico. Cambios en la velocidad espacial dentro del rango estudiado no modifican apreciablemente el desempeño del catalizador, sugiriendo un buen potencial comercial al incrementar el volumen de alimentación.

## Agradecimiento

Este proyecto fue financiado por INTEVEP, CONICIT-CONIPET Proyecto 97003734 y CDCH-UCV P. G 03-12-5419/2004. Félix Avenado del IUT Región Capital por los análisis de TPD de amoniaco.

## Referencias Bibliográficas

- MOOIWEER H.H., DE JONG K.P., KRAUSHAAR-CZARNETZKI B., STORK W.H.J., KRUTZEN B.C.H. *Studies in Surface Science and Catalysis* 84: 2327-2334, 1994.
- RUTENBECK D., PAPP H., FREUDE D., SCHWIEGER W. *Applied Catalysis. A General* 206: 57- 66, 2001.
- BUTLER A.C., NICOLAIDES C.P. *Catalysis Today* 18:443-471, 1993.
- GUINET M., ANDY P., BOUCHEFF Y., GNEP N.S., TRAVERS C., BENAZZI E. *Catalysis Letters* 50:159-164, 1998.
- KUHLMANN E., PASCOE J., THOM C. *United States Patent* 5, 463, 160, 1995.
- APELIAN M., RAHMIMI I., FUNG A., HUSSA. *United States Patent* 5, 321, 194, 1994.
- LOK B.M., MESSINA C.A., PATTON R.L., GAJEK R.T., CANNAN T.R., FLANIGEN E. *United States Patent* 4, 440, 871, 1984.
- BAECK H.S., LEE M.K, LEE Y.W. *Catalysis Letters* 52:221-225, 1998.
- TRAN M.T., GNEP N.S., GUINET M., NASCIMENTO P. *Catalysis Letters* 47:57-61, 1997.
- ESCALANTE D., MENDEZ B., HERNÁNDEZ G., LOPEZ C.M., MACHADO F.J., GOLDWASSER J., RAMÍREZ DE AGUDELO M.M. *Catalysis Letters* 47:229-233, 1997.
- FINELI Z., FIGOLI N., COMELLI R. *Catalysis Letters* 51:223-228, 1998.
- MORTERRA C., CERRATO G., DI CIERO S., SIGNORETTO M., MINESO A., PINNA F., STRUKUL G. *Catalysis Letters* 49:25-34, 1997.
- MAURER T., KRAUSHAAR-CZARNETZKI B. *Journal of Catalysis* 187:202-208, 1999.
- FOTTINGER K., KINGER G. VINEK H. *Applied Catalysis. A General* 249: 205-2012, 2003.
- HOCHTL M., JENTYS A., VINEK H. *Applied Catalysis. A General* 207: 397- 405, 2001.

16. YANG S.M., LIU S.Y. LIU. **Proceedings from the ninth International Zeolite Conference**. Eds, Von Ballmoos et al., Butterworth-Heinemann pp. 623-630, 1994.
17. ALFONSO M., GOLDWASSER J., LOPEZ C.M., MACHADO F.J., MATJUSHIN M., MENDEZ B., RAMÍREZ DE AGUDELO M.M. **Journal of Molecular Catalysis** 98: 35-48, 1995.
18. LOPEZ C.M., MACHADO F.J., MENDEZ B., PINTO M., SAZO V., GOLDWASSER J., RAMÍREZ M.M. **Topics in Catalysis** 10 : 65-71, 2000.
19. VIEIRA A., TOVAR M., PFAFF C., BETAN-COURT P., MENDEZ B., LOPEZ C.M., MACHADO F.J., GOLDWASSER J., RAMIREZ DE AGUDELO M.M., HOUALLA M., **Journal of Molecular Catalysis** 144: 101-116, 1999.
20. HERRERA G., LARDIZABAL D., COLLINS MARTINEZ V., AGUILAR ELGUEZABAL A. **Catalysis Letters** 76:161-166, 2001.
21. ARIAS D., CAMPOS, I., ESCALANTE D., GOLDWASSER J., LOPEZ C. M., MACHADO F.J., MENDEZ B., MORONTA D., PINTO M., SAZO V., RAMÍREZ DE AGUDELO M.M. **Journal of Molecular Catalysis** 122: 175-186, 1997.
22. LOPEZ C.M. DE SOUSA M., CAMPOS I., HERNÁNDEZ L., GARCIA L. **Applied Catalysis A** 258: 195-202, 2004.