



## II-063 - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS ZEOLITAS NATURALES COMO MEDIO FILTRANTE

### **Eduardo Márquez Canosa<sup>(1)</sup>**

Facultad de Ing. Química, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (ISPJAE), Cuba - Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 1997 y Doctorado en Ciencias Técnicas, 1999 (ISPJAE) - Profesor en el Departamento de Fundamentos Químicos y Biológicos.

### **Tomás Noel Herrera Vasconcelos**

Facultad de Ing. Química, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (ISPJAE), Cuba. Doctorado en Ciencias Técnicas en la Universidad Técnica de Praga - República Checa, 1984 - Profesor en el Departamento de Fundamentos Químicos y Biológicos - Profesor Convidado de la Universidade Cruzeiro do Sul (UNICSUL) - São Paulo - Brasil.

### **Nancy Maritza Gutiérrez Duque**

Facultad de Ing. Química, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (ISPJAE), Cuba. Maestría en Análisis de Procesos, 1977. Doctorado en Ciencias Técnicas, 1987, ISPJAE. Profesora del Departamento de Ing. Química.

**FOTOGRAFIA  
NÃO  
DISPONÍVEL**

**Dirección<sup>(1)</sup>:** Calle Bullén 7L el Cañongo y Diago, Puentes Grandes - Playa - Ciudad Habana - Cuba. - e-mail: [eduardi@mufmail.com](mailto:eduardi@mufmail.com)

### **RESUMEN**

Este trabajo tiene como objetivo, caracterizar física y químicamente a las zeolitas naturales cubanas como medio filtrante, realizándoles los diferentes ensayos establecidos para los materiales tradicionales (arena y antracita), así como los de la norma rusa utilizada para zeolitas naturales de esa región. Se determinó además si existen diferencias significativas entre zeolitas de diferentes tipos.

Esta evaluación tiene una gran importancia, dado que no existe ningún reporte hasta el momento sobre las propiedades físico-químicas de los yacimientos de zeolitas naturales cubanas, desde el punto de vista de su uso como material filtrante, y tampoco se encontraron reportes en la literatura consultada sobre los valores obtenidos al aplicar a las zeolitas normas internacionales utilizadas tradicionalmente para la arena sílice y la antracita.

Además la importancia práctica de este trabajo consiste en que se caracteriza un medio filtrante, que es una alternativa que contribuye a eliminar el déficit de arena sílice con las características de material filtrante para potabilización, que existe en Cuba, la cual tiene una reserva pronosticada de 13700 millones de toneladas métricas de zeolita.

Del análisis de los resultados se concluye que toda zeolita cuya composición química y mineralógica esté en el rango analizado puede utilizarse como medio filtrante.

**PALABRAS-CLAVES:** Zeolitas Naturales, Clinoptilolita, Mordenita, Filtración, Medios, Filtrantes.

### **INTRODUCCIÓN**

La filtración en medios porosos se ha realizado con diferentes materiales filtrantes, siendo la arena, el más difundido.

En Cuba no es muy abundante este material con las características físico-químicas requeridas. Ha sido difícil obtener la cantidad de arena que es necesaria para utilizar en los filtros, con las características que establecen las normas.

Existen plantas de tratamiento de agua frecuentemente con déficit de material filtrante.

Cuba es uno de los países que presenta mayores reservas de zeolita en el mundo. Es por ello, que teniendo en cuenta los abundantes yacimientos de este mineral que se encuentran distribuidos en todo el país, sus conocidas propiedades como adsorbente y tamiz molecular, así como el déficit de la arena cuarzosa se plantea como objetivo de este trabajo:



- Evaluar las características físico-químicas de las zeolitas naturales cubanas como medio filtrante.
- El desarrollo de este trabajo contó también con el apoyo del Centro de Investigación para la Industria Minero Metalúrgica de Cuba (CIPIIMM) y el Acueducto de Ciudad Habana.

## MATERIALES Y METODOS

Las tareas desarrolladas fueron:

- a) Caracterización físico-químicas y mineralógica del material zeolítico a utilizar.
- b) Determinación de la resistencia química y mecánica de los materiales filtrantes.
- c) Caracterización de la distribución granulométrica de los materiales empleados, así como de otras propiedades físicas más importantes.

Se utilizaron 30 muestras de cada yacimiento. Los yacimientos objeto de estudio fueron Tasajera, Piojillo y San Andrés, ubicados en Santa Clara y Holguín, respectivamente, los cuales son representativos de los yacimientos cubanos.

### Caracterización físico-químicas y mineralógica del material zeolítico a utilizar

Las zeolitas naturales utilizadas durante la experimentación, corresponden a muestras tecnológicas de cada yacimiento, suministradas por el Centro de Investigación para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIIMM) de Cuba.

Los análisis realizados en la caracterización fueron:

#### ➤ Difracción de rayos X (DRX).

La caracterización de la composición de fases se determinó por difracción de rayos X, utilizando un difractómetro automatizado PHILLIPS PW-1710 con radiación  $K\alpha$  Cu y filtro de Ni.

#### ➤ Capacidad de Intercambio Catiónico Total (CICT).

La capacidad de intercambio catiónico total se determinó mediante el contacto con disolución de  $NH_4Cl$  de concentración molar 0.25 mol/ L durante 24 horas.

#### ➤ Absorción Atómica (AA).

La capacidad por cationes intercambiables se realizó utilizando lavado previo con alcohol y en contacto con disolución de  $NH_4Cl$  de concentración molar 0.25 mol/ L durante 24 horas.

La determinación de los cationes  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  en los licores, se realizó utilizando un espectrómetro de absorción atómica SP 1900, Pye Unicam. La determinación de silicio y aluminio en los licores se realizó por medio de un espectrómetro SP 9, Pye Unicam, utilizando una llama de acetileno-óxido nitroso.

## DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA QUÍMICA Y MECÁNICA DE LAS ZEOLITAS UTILIZADAS.

### Resistencia mecánica.

En la determinación de la resistencia mecánica se realizaron diferentes ensayos.

#### a) Dureza.

Para la determinación de la resistencia mecánica basado en el concepto de dureza, el ensayo se realizó determinando el porcentaje que se obtiene por abrasión en el lavado para un 30% de expansión de lecho de zeolita durante 60 horas .

**b) Friabilidad.** La friabilidad se determinó mediante la trituración de 50 g del material en un molino de bolas de 34 cm de diámetro, que gira a una velocidad de 25 r.p.m con 18 bolas de acero de diámetro 12 mm. Para valorar la friabilidad se efectúan, además, dos mediciones, una después de los quince minutos de funcionamiento (750 golpes, es decir, 375 vueltas) y otra a los 30 minutos (1500 golpes, que equivalen 750



vueltas). Se establece la curva granulométrica del material después de cada ensayo, evaluando el cambio de la talla efectiva del mismo.

#### e) Tracción y Trituración.

Este ensayo responde para la caracterización del material zeolítico desde el punto de vista mecánico, de acuerdo con la norma rusa del Ministerio para la Producción de Abonos Minerales, 1986.

Se evalúa poniendo en contacto 100 g (m) del material con fracción (-1+ 0.5) mm con 150 mL de agua destilada en un equipo vibratorio que realiza 120 vibraciones por minuto por 24h., tamizando el producto con un juego de tamices de 0.5 y 0.25 mm.

Se pesan el rechazo ( $m_1$ ) y el tamizado ( $m_2$ ) del tamiz de 0.25 mm. Los % de tracción y trituración se determinan como:

$$\% \text{Tracción} = \frac{m_2}{m} \cdot 100 \quad (\text{II-1})$$

$$\% \text{Trituración} = \frac{m_1}{m} \cdot 100 \quad (\text{II-2})$$

## RESISTENCIA QUÍMICA

### a) Ensayo de resistencia al ácido.

Este ensayo establecido para la arena y antracita. Se evalúa la pérdida de peso del material en contacto con HCl al 40% durante 24 h.

### b) Ensayo de resistencia em diferentes medios.

Este ensayo responde a la caracterización de la zeolita desde el punto de vista químico, de acuerdo con la norma rusa mencionada anteriormente), y evalúa el aporte de sílice, oxidabilidad y residuo seco de 100 g del material zeolítico en contacto por dos ocasiones con 500 mL de diferentes medios, HCl,  $c(\text{HCl})=0.013$  mol/L; NaCl,  $c(\text{NaCl})=0.0085$  mol/L;  $\text{Cl}_2$ ,  $c(\text{Cl}_2)=30$  mg/l; NaOH,  $c(\text{NaOH})=0.005$  mol/L y agua del acueducto, permaneciendo en contacto por 24 h.

Tanto a los resultados de resistencia química como a los de resistencia mecánica, se les realizó un análisis estadístico utilizando el programa STATISTICA para Windows versión 4.5, 1995.

Para conocer la influencia de los tipos de zeolitas en todos los ensayos anteriores, tanto a la resistencia química como la mecánica, se les realizó un análisis de varianza en el cual la F de Fisher, para su comparación, fue tomada con el 95 % de confiabilidad. También fue realizada la prueba de Duncan.

En el caso de la resistencia mecánica se realizó el análisis con una variable de clasificación, tipo de zeolita, mientras que, para el análisis de la influencia del tipo de zeolita en la resistencia química y la influencia de los diferentes medios, el análisis de varianza fue de dos variables de clasificación, medio y tipo de zeolita.

## Caracterización del material granular.

### a) Distribución granulométrica.

En la determinación de la composición granulométrica de los materiales, se utilizó la técnica del tamizado de acuerdo a métodos de clasificación usando tamices normalizados, según norma DIN 4188.

### b) Determinación de la densidad de partículas.

La determinación de la densidad de partículas se realizó por el método pignométrico de acuerdo con estándar de ensayo del laboratorio del Centro de Investigaciones Geológicas "Isaac del Corral".

### c) Determinación de la densidad aparente.

La densidad aparente por su parte resultó de medir un volumen dado de material granular en probeta y su masa correspondiente.

**d) Porosidad.**

La porosidad del conglomerado para cada tipo de zeolita se determinó a partir de la relación, que responde a la forma habitual de definirla:

$$\varepsilon = \frac{(\rho_p - \rho_a)}{\rho_p} \quad (\text{II-3})$$

Donde:

$\rho_p$ : densidad de partícula. ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\rho_a$ : densidad aparente ( $\text{kg/m}^3$ ).

$\varepsilon$ : porosidad.

**e) Factor de forma.**

Las partículas de la zeolita natural tienen una forma irregular. La determinación experimental del factor de forma de los materiales objeto de ensayo se realizó midiendo la resistencia hidráulica de una capa, compuesta por partículas del material dado con la granulometría de trabajo, utilizando agua como fluido, midiendo las variaciones de presión ( $\Delta P$ ) para diferentes valores de velocidad que responden al régimen laminar y calculándose la misma a partir de la ecuación de Kozeny y Carman.

$$\Delta P = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu L}{\psi^2 \varepsilon^3 D_p^2} v \quad (\text{II-4})$$

**ANÁLISIS DE RESULTADOS****I - Determinación De La Composición Química Y Mineralógica De Las Zeolitas Utilizadas.**

Las propiedades de la zeolita natural cubana (como adsorbente y tamiz molecular), así como las propiedades hidrodinámicas de un medio filtrante dependen en gran medida de su composición química y mineralógica.

Para simplificar la exposición nos referiremos a las zeolitas 1, 2 y 3 siendo las correspondientes a los yacimientos de Tasajera, Piojillo y San Andrés. Un mejor conocimiento sobre la naturaleza de los materiales filtrantes objeto de estudio se logró al determinar la composición química y mineralógica de los mismos que se recogen en las tablas 1, 2 y 3.

**Tabla 1. Composición Química de las Diferentes Zeolitas.**

COMPOSICIÓN QUÍMICA			
COMPOSICIÓN % EN PESO	ZEOLITA(1) TASAJERA	ZEOLITA(2) PIOJILLO	ZEOLITA(3) SAN ANDRES
SiO <sub>2</sub>	66.62	64.30	63.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.17	9.43	12.45
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.08	2.18	0.81
CaO	3.19	3.24	2.36
MgO	0.77	0.81	0.69
Na <sub>2</sub> O	1.53	2.08	1.20
K <sub>2</sub> O	1.20	1.00	2.31
PPI	11.02	15.10	15.51
<b>Total</b>	<b>98.58</b>	<b>98.14</b>	<b>98.54</b>
SiO <sub>2</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (mol)	<b>9.29</b>	<b>11.57</b>	<b>8.61</b>

**Tabla 2. Capacidad de Intercambio Cationico Total (Cict) Y por Elemento.**

CATION (meq/100g)	ZEOLITA(1) TASAJERA	ZEOLITA(2) PIOJILLO	ZEOLITA(3) SAN ANDRES
Ca <sup>2+</sup>	94.48	88.03	75.98
Mg <sup>2+</sup>	4.13	2.84	8.28
Na <sup>2+</sup>	32.49	45.15	32.38
K <sup>+</sup>	7.59	3.09	6.94
<b>CICT(meq/100g)</b>	<b>138.69</b>	<b>158.84</b>	<b>123.58</b>

Los resultados de la composición química muestran el alto contenido de sílice y aluminio propio de aluminosilicatos, presentando los tres tipos de zeolita analizadas una alta relación molar SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (8.6-11.6), típico de zeolitas con un alto contenido de sílice. Estos valores de la relación sílice/aluminio permiten esperar una mayor estabilidad térmica y frente a los agentes ácidos, lo que tiene indiscutible valor práctico.

Los tres tipos de zeolita pueden agruparse como del tipo cálcica-sódica, de acuerdo a los porcentos de estos elementos.

La capacidad de intercambio catiónico total, así como por cationes intercambiables, muestra la relativamente alta capacidad de intercambio iónico en estas zeolitas naturales.

**Tabla 3. Composicion Mineralogica de las diferentes Zeolitas.**

COMPOSICION MINERALOGICA(%)			
DETERMINACIÓN (%)	ZEOLITA (1) TASAJERA	ZEOLITA (2) PIOJILLO	ZEOLITA (3) SAN ANDRES
Clinoptilolita	49	38	40
Mordenita	12	45	35
Montmorillonita	Poco	ND	ND
Calcita	poco	1	1
Cuarzo	Poco	Poco	poco
Feldespato	ND	Poco	poco
<b>Zeolita total</b>	<b>61</b>	<b>83</b>	<b>75</b>

ND: Valor no determinado.

De la composición mineralógica se observa un elevado contenido de fase zeolítica (61- 83%), lo que nos indica sus potencialidades como adsorbentes, predominando la Clinoptilolita y la Mordenita en una relación que oscila entre 0.84 - 4.08. Del contenido total zeolítico resultó ser la muestra tecnológica del yacimiento de Piojillo tipo I de muy buena calidad, 83 % de material zeolítico, el yacimiento de San Andrés también tipo I con 75 % y el de Tasajera tipo II con un 61 % de material zeolítico.

## II - DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA Y QUIMICA

Los resultados obtenidos para la resistencia mecánica en cuanto al ensayo de dureza, se reportan a continuación, en la tabla 4.

**Tabla 4 - Resultados de la Dureza.**

ZEOLITAS	% DE DUREZA	INTERVALO DE CONF. <95%	INTERVALO DE CONF. >95%
	$\bar{x}$ Cv		
Tasajera(1)	1.08 <sup>a</sup> 2.1	0.88	1.28
Piojillo(2)	1.99 <sup>b</sup> 1.1	1.89	2.08
San Andrés(3)	2.15 <sup>c</sup> 1.4	2.03	2.27

Los valores recomendados para la dureza son que el porcentaje de pérdida debe ser inferior al 4%, para la arena y antracita. (Arboleda, 1973; Ives, 1995), por lo que la zeolita cumple con este valor, existiendo diferencia significativa con un 95% de confiabilidad (prueba F) entre las zeolitas.

En cuanto al ensayo de friabilidad, para todas las zeolitas, el % de pérdida estuvo como valor medio entre 10 y 13%, para 15 min. y entre 19-22% para 30 min.. Por lo que clasifican como buena en el campo de utilización normal.

La prueba de Duncan ( $p=5\%$ ) fue realizada para el ensayo de dureza y friabilidad presentando la zeolita del yacimiento de Tasajera el mejor comportamiento para ambos ensayos. No se encontraron en la literatura consultada valores reportados para estos ensayos para la zeolita, de ahí una de las importancias del trabajo realizado.

El ensayo de tracción se reporta en la tabla 5.

**Tabla 5 - Resultado de la Tracción.**

ZEOLITA	% DE TRACCION	INTERVAL DE CONF. <95%	INTERVAL DE CONF. >95%
	$\bar{x}$ %Cv		
Tasajera(1)	0.30 <sup>a</sup> 7.0	0.30	0.32
Piojillo(2)	0.87 <sup>b</sup> 6.1	0.85	0.89
San Andrés(3)	0.32 <sup>a</sup> 9.7	0.31	0.33

El análisis estadístico realizado al ensayo de tracción reportado en la tabla 5, demostró que existe diferencia significativa entre estos tipos de zeolitas, mientras que la aplicación de la prueba de Duncan ( $p=5\%$ ) establece que las zeolitas de los yacimientos de Tasajera (1) y San Andrés (3), pertenecientes a un mismo grupo son las que presentan el mejor comportamiento para el ensayo de tracción.

Se obtuvieron resultados similares en el ensayo de trituración. En ambos ensayos los valores son inferiores a los valores límites (2.5 para tracción y 4.5 para trituración).

Para analizar la resistencia química se determinó la contribución de oxidabilidad, sílice y residuo seco de la zeolita en diferentes medios.

En el caso de la oxidabilidad se reportan en la tabla 6 los valores.

**Tabla 6 - Resultados de la Resistencia Química. Ensayo de Oxidabilidad.**

OXIDABILIDAD	NaCl	HCl	NaOH	H <sub>2</sub> O	Cl <sub>2</sub>
Zeolita	$\bar{x}$ %Cv	$\bar{x}$ %Cv	$\bar{x}$ %Cv	$\bar{x}$ %Cv	$\bar{x}$ %Cv
Tasajera(1)	3.13 <sup>a</sup> 1.9	3.39 <sup>d</sup> 0.5	2.50 <sup>e</sup> 1.3	2.38 <sup>j</sup> 1.2	1.58 <sup>m</sup> 2.19
Piojillo(2)	1.52 <sup>b</sup> 1.6	0.63 <sup>e</sup> 3.5	1.10 <sup>h</sup> 0.9	0.45 <sup>k</sup> 3.8	1.59 <sup>n</sup> 1.19
San Andrés(3)	0.89 <sup>c</sup> 1.9	1.82 <sup>f</sup> 1.7	1.56 <sup>i</sup> 1.9	2.12 <sup>l</sup> 1.1	0.57 <sup>n</sup> 4.51



Se puede plantear que existen diferencias significativas en cuanto al tipo de zeolita utilizada, al igual que para cada zeolita en cuanto al medio La prueba de Duncan corrobora lo anterior.

Los valores de oxidabilidad y sílice fueron inferiores a los límites establecidos (no mayor de 10 mg/L, Norma Rusa sobre Zeolita del Ministerio de Producción de Abonos Minerales, 1986).

Para el residuo seco, se reportan sus resultados en la tabla 7.

**Tabla 7 - Resultados de la Resistencia Química - Ensayo de Residuo Seco.**

RESIDUO SECO	NaCl	HCl	NaOH	H <sub>2</sub> O	Cl <sub>2</sub>
Zeolita	$\bar{x}$ %Cv	$\bar{x}$ %Cv	$\bar{x}$ %Cv	$\bar{x}$ %Cv	$\bar{x}$ %Cv
Tasajera(1)	89.35 1.7	76.18 1.8	44.90 7.8	10.68 2.8	41.98 1.4
Piojillo(2)	66.95 1.6	65.20 1.0	84.06 0.3	10.62 2.6	42.46 1.2
SanAndrés(3)	48.16 3.5	49.16 1.3	33.21 1.0	10.91 2.7	43.23 1.4

Del análisis estadístico se puede inferir para un 95% de confiabilidad que entre medios sí hay variaciones marcadas; al igual que para el tipo de zeolita. En cuanto a los valores alcanzados en cada medio, los mismos superan los límites recomendados (no mayor de 20 mg/L) excepto para el agua. Los resultados de la aplicación de la prueba de Duncan corroboran lo anterior

El hecho de que aunque para los diferentes medios, excepto para el agua del acueducto, se obtuvo un valor de residuo seco por encima de lo establecido por la norma rusa, no invalida a las zeolitas utilizadas como material filtrante, debido a que existen dos factores que a nuestro entender parecen haber influido, el porcentaje de Clinoptilolita menor de 60 (Norma establece valor mínimo de 60 %) y la porosidad del papel de filtro utilizado Las pruebas a nivel de estación de tratamiento que se realizaron posteriormente demostraron la validez de estos y otros resultados relacionados con la resistencia química y mecánica En la estación de tratamiento de agua la pérdida de material zeolítico en 2 años de trabajo fué de 2.9%, la calidad del agua fue mejor y se obtuvieron tiempo de servicio de 1.6 a 2 veces mayores en comparación con los filtros de arena sílice y antracita.

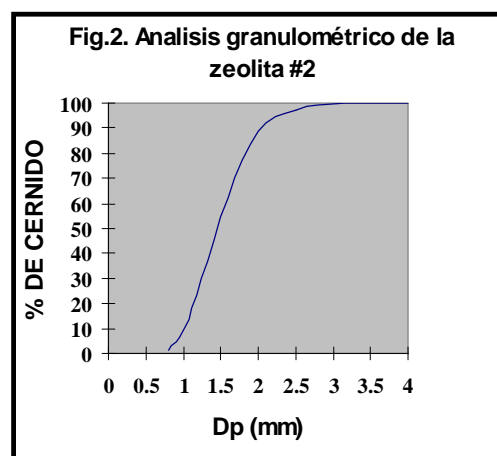
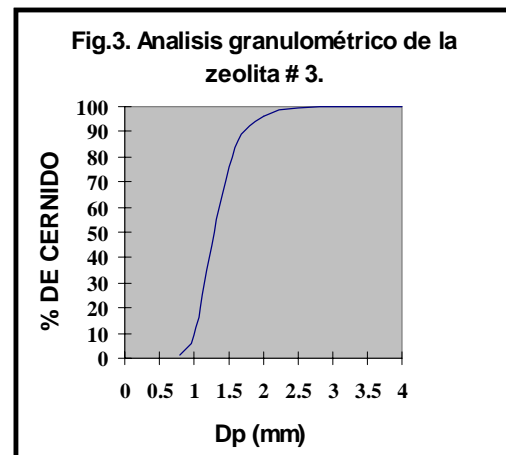
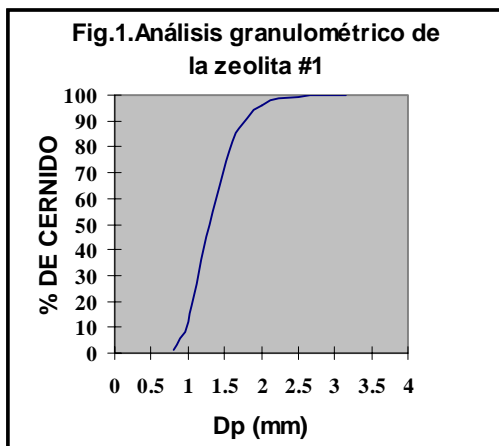
De acuerdo con el ensayo de solubilidad en HCL, que es el recomendado para arena y antracita, este tiene que ser menor del 5 %. Se obtuvieron valores medios para las diferentes zeolitas de 2.5% a 2.7%, lo cual se explica debido a la alta relación sílice/aluminio de las zeolitas. No existen diferencias significativas entre los valores.

### III - ANALISIS GRANULOMÉTRICO DE LAS ZEOLITAS

Los valores obtenidos de la talla efectiva (TE), el coeficiente de uniformidad (CU), así como del diámetro superficial volumétrico (Dpv) para cada zeolita, se reportan en la tabla 8.

**Tabla 8 - Resultados Del Analisis Granulometrico.**

ZEOLITA	TE (mm)	Cu	Dpv (mm)
Tasajera(1)	0.95	1.41	1.34
Piojillo(2)	1.10	1.43	1.40
San Andrés(3)	1.05	1.40	1.36



Se puede plantear que tanto la talla efectiva como el coeficiente de uniformidad, así como el diámetro superficial volumétrico, son adecuados para las muestras utilizadas de acuerdo con lo planteado por diferentes autores.

#### IV - DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE PARTÍCULA, LA POROSIDAD Y EL FACTOR DE FORMA DE LAS ZEOLITAS

Dentro de los parámetros fundamentales y características de los materiales granulares se encuentran, la densidad de partícula ( $\rho_p$ ), la porosidad ( $\epsilon$ ) y el factor de forma ( $\psi$ ), los cuales influyen directamente en el comportamiento hidrodinámico del proceso de filtración en medios porosos. A continuación se muestran en la tabla 9 los resultados con la zeolita de Tasajera, los cuales fueron similares a las zeolitas de Piojillo y San Andrés. En la tabla 10 se muestra los de arena silice procedente de yacimiento de Buena Vista utilizada en la mayoría de las plantas de tratamiento de agua del país.

**Tabla 9 - Propiedades de la Zeolita Tasajera (1) Utilizada en los Filtros.**

<b>ZEOLITA TASAJERA</b>	$\bar{x}$	% Cv	<b>INTERVALO DE CONF. &lt;95%</b>	<b>INTERVALO DE CONF. &gt;95%</b>
$\rho_p$ (kg/ m <sup>3</sup> )	2120.00	1.46	2118.00	2121.00
$\rho_a$ (kg/ m <sup>3</sup> )	1021.00	1.76	1020.00	1022.00
$\epsilon$	0.51	0.40	0.50	0.52
$\psi$	0.64	1.97	0.63	0.65





**Tabla 10 - Propiedades de la Arena Utilizada en los Filtros.**

ARENA	$\bar{X}$	% Cv	INTERVALO DE CONF. <95%	INTERVALO DE CONF. >95%
$\rho_p$ (kg/ m <sup>3</sup> )	2600.00	1.47	2595.30	2602.90
$\rho_a$ (kg/ m <sup>3</sup> )	1563.00	7,73	1552.20	1574.70
$\epsilon$	0.39	2.62	0.38	0.40
$\psi$	0.71	2.46	0.70	0.72

Como se puede observar, la arena presenta una densidad de partícula superior a las zeolitas analizadas así como su factor de forma, producto de su forma más redondeada, mientras que la porosidad de la cama es mucho menor. Estas propiedades son importantes para las condiciones de lavado de los filtros, en cuanto al consumo de agua de lavado y pérdida del material por arrastre; así como en las condiciones de operación, para garantizar una buena calidad del agua y una distribución uniforme de la pérdida de carga a lo largo del lecho.

## CONCLUSIONES

Todo lo anterior permite plantear:

- Se caracterizaron por primera vez a los materiales granulares de zeolitas naturales cubanas. Para todas las zeolitas los resultados fueron similares, independientes del tipo de yacimiento, obteniéndose como valores medios:  $\rho_p = 2131 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_a = 1021 \text{ kg/m}^3$ ,  $\epsilon = 0.52$ ;  $\psi = 0.63$ .
- La zeolitas estudiadas cumplen con los valores recomendados por las normas de medios filtrantes para la arena sílice y la antracita, determinándose los valores característicos para las zeolitas al aplicar las mismas.
- Para los ensayos de la resistencia química y mecánica por la norma rusa para sus materiales zeolíticos se puede plantear que en cuanto a la resistencia mecánica, las zeolitas naturales cubanas cumplen con los valores recomendados, existiendo diferencias significativas para los tipos de zeolitas. En cuanto a la resistencia química se cumple para la oxidabilidad y la sílice, no así para el residuo seco que sólo se cumple para el agua como medio.
- Quedan establecidos por primera vez para la zeolita natural cubana los valores de resistencia química y mecánica.
- Toda zeolita cuya composición química y mineralógica esté en el rango analizado puede utilizarse como medio filtrante.
- Los resultados en estaciones de tratamiento de agua han confirmado la validez de los resultados obtenidos al evaluar las características físico-químicas de las zeolitas naturales estudiadas.

## RECOMENDACIÓN

- Generalizar en diferentes sistemas de tratamiento de aguas para la industria y el consumo humano, la filtración con zeolita natural.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Arboleda, J. "Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua". CEPIS, España,(1963).
2. Cleasby, J. C. & Di Bernardo, L. "Hydraulic Consideration in Declining-Rate Filtration. Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, New York, V 106, No EE6, p. 1043- 1055, (1980).
3. Cox, Ch. R. "Prácticas y Vigilancia de las Operaciones de Tratamiento de Agua". Ed. Científico-técnica,(1979).
4. Degremont. "Water treatment handbook". Ed. Elexpuru Hnos S.A., BilBao, (1979).



5. Di Bernardo, L. "Métodos y Técnicas de tratamiento de aguas." Volumen 2, Ed. Asociación Brasileira de Ingeniería Sanitaria, ABES, 1993.
6. Ives Kenneth J. "The Inside Story of Water-Treatment Processes". Journal of environmental engineering, Vol. 121, No. 12, (1995).
7. Kasatkin, A. G. "Operaciones Básicas y Aparatos en la tecnología Química". Ed. Pueblo y Educación, Tomo 1, (1985).
8. Nikoladze G, et al. "Water treatment for public and industrial supply". MIR publishers., Moscow., (1989).
9. Nordel, E. "Tratamiento de aguas para la industria y otros usos". CIA. Editorial Continental, (1975).
10. Ministerio para la Producción de Abonos Minerales. NORMA C.T. 113-12-71-86. Ed. Jimia, RUSIA, (1986).
11. O'Melia, C. R. "Particles Pretreatment and Performance in Water Filtration". Journal of Environmental Engineering, 111(6), p. 874-890, (1985).
12. O' Melia, C. R. & Crapps, D. K. "Some Chemical Aspects of Rapid Sand Filtration". Journal American Water Works Associaton, 56(10), p.1326-1344, (1964).
13. Romero D., J.C. "La zeolita." Instituto de investigaciones geológicas. Habana 1978
14. Rudenko, G. Et. al. "Filtro de zeolita (clinoptilolita) para el tratamiento de aguas con alta turbiedad en la región de los Carpatos". . Jimia, I. Tecnología Vodi. V(1), (1983).
15. Standard Methods for the examination of water and wastewater, 18<sup>th</sup> edition, APHA, AWWA, WEF. (1992).
16. Tarasevich, R. y otros. "Tratamiento de Aguas superficiales con filtros de zeolitas". Tecnología, Vody .(1983).
17. Tarasevich V. y col. "Uso de la Clinoptilolita para la filtracion de aguas del rio Ush" Jimia I. Tecnología Vody V(4), (1989).