

PRODUCCIÓN DE ESPUMAS SÓLIDAS DE CELULOSA Y ALMIDÓN DE YUCA

SOLID FOAM PRODUCTION OF CELLULOSE AND CASSAVA STARCH

MAYLEN FERRER GARCÍA¹, SHIRLEY MARFISI VALLADARES¹, JOSÉ ÁNGEL DANGLAD FLORES^{1,2},
LAURA CECCONELLO¹, BLANCA ROJAS DE GASCUE³

¹ Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, Departamento de Ingeniería Química, Grupo de Investigación en Sistemas Dispersos y Electroquímica, Barcelona, Venezuela, ² Siderúrgica del Orinoco (SIDOR, C.A.), Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales, Puerto Ordaz, Venezuela, ³ Universidad de Oriente, Instituto de Investigaciones en Biomedicina y Ciencias Aplicadas "Dra. Susan Tai", Cumaná, Venezuela
E-mail: smarfisi@udo.edu.ve / maylenferrer@gmail.com

RESUMEN

La reutilización de desechos sólidos es una alternativa viable por el potencial ahorro en energía, agua potable y materias primas indispensables para favorecer una economía de desarrollo sostenible. En este sentido, se llevó a cabo la producción de espumas sólidas utilizando celulosa a partir de papel Bond reciclado y gel de almidón de yuca como fase líquida, estabilizando el sistema con surfactantes (hidroxietilcelulosa como espesante y lauril sulfato de sodio como espumante). La espuma se formó mediante el método de Ross-Miller modificado, por aireación y mezclado con agitación fuerte a 10.000 rpm durante 5 min y secandola en un horno de bandeja. La formulación óptima correspondió a 15 g celulosa, 15 g almidón de yuca y 0,3 mol/L espumante; con las siguientes características estructurales, físicas y mecánicas: matriz sólida conformada por una microestructura de fibras de celulosa entrecruzadas con hojuelas de almidón; superficie externa sin desprendimiento de polvo al contacto ni olor apreciable; densidad y porosidad promedio de 173,49 kg/m³ y 73,22%, respectivamente; capacidad de absorción de agua de 512%; estabilidad térmica hasta 120°C y aislamiento térmico hasta un diferencial de 50°C. En cuanto a los parámetros indicativos de amortiguación, la resistencia a la compresión fue 3,99 kg/cm² de área con poca deformación (20% de altura original). Estas propiedades hacen competitivas las espumas obtenidas a partir del almidón de yuca nacional y papel reciclado, respecto a las espumas importadas disponibles comercialmente, y hacen factible su uso como excelente material aislante y absorbente para diversas aplicaciones en construcción, embalaje y relleno.

PALABRAS CLAVE: Papel reciclado, surfactante, aislante térmico.

ABSTRACT

Waste solids reutilization is an alternative to save energy, water and raw materials necessary for an eco-economy of sustainable development. In that sense, solid foams were produced using cellulose from recycled Bond paper and cassava starch gel as liquid phase, stabilizing the system with surfactants (hydroxyethylcellulose as thickener and sodium lauril sulfate as foaming). The foam was prepared through the modified Rosse-Miller method, by aeration and strong stirring at 10,000 rpm for 5 min, and drying it in a tray oven. The optimum formulation was 15 g of cellulose, 15 g of cassava starch and a concentration of 0.3 mol/L of foaming; with the following structural, physical and mechanical features: solid matrix with cross linked microstructure between cellulose fibers and starch flakes; outer surface without dusting at contact and odorless; average density and porosity 173.49 kg/m³ and 73.22%, respectively; 512% of swelling; thermal stability up to 120 °C and thermal insulation with 50 °C of differential temperature. With respect to cushioning parameters, compression strength was 3.99 kg/cm², with a slight deformation (20% from original height). These properties make the foams obtained from national cassava starch and recycled paper, competitive compared to imported commercially available foams, and make possible their use as excellent absorbent insulating material for various applications in construction, packaging and filling.

KEY WORDS: Recycled paper, surfactant, thermal insulation.

INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental producida por desechos sólidos se ha convertido desde hace mucho tiempo en un grave problema debido al volumen considerable generado a partir de fuentes domésticas e industriales (Bustos 2009). La mayoría de estos desechos producidos en oficinas, escuelas, universidades, comercios e industrias consisten en papel, cartón y plástico que pueden ser reutilizados para la fabricación de nuevos productos.

Las espumas sólidas son materiales versátiles que proporcionan una gama de posibilidades para el desarrollo

de diversas aplicaciones: aislantes térmicos, material de embalaje, envases para alimentos, relleno de colchones, fórmica, bloques, entre otros. Debiagi *et al.* (2011) elaboraron espumas biodegradables a partir de almidón de yuca, alcohol polivinílico (PVA), fibras de bagazo de caña y quitosano, utilizando el método de extrusión. La adición de almidón/PVA en altas proporciones aumentó la expansión y resistencia mecánica de las espumas. Tales formulaciones resistieron hasta un 75% de humedad relativa de almacenamiento.

Reolon y Laurindo (2010) formularon bandejas de espumas sólidas con almidón de yuca, caliza

dolomítica, eucalipto y fibras de celulosa para el envasado de productos alimenticios; el incremento de fibras celulósicas promovió una disminución en la densidad y resistencia a la tracción de las espumas. Torres *et al.* (2008) fabricaron plásticos biodegradables y compostables a partir de recursos naturales como tubérculos y semillas, obteniendo dos tipos de plásticos: termoplásticos de almidón y ácido poliláctico (PLA), con los cuales fabricaron envases (bandejas) para embalaje.

Para la producción de espumas sólidas en la presente investigación se combinó el reciclaje de papel Bond usado y materiales autóctonos derivados de la agroindustria como el almidón de yuca, con la finalidad de obtener un producto ecológico y funcional con diversas aplicaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

Elaboración de la espuma sólida

Se estableció un diseño de experimentos multifactorial 3^3 como se especifica en la Tabla 1, variando los siguientes factores: masa de celulosa, masa de almidón de yuca y concentración de la solución de surfactante aniónico espumante lauril sulfato de sodio (DSS) al 95% de pureza (*Scharlau*). La masa del surfactante polimérico no iónico hidroxietilcelulosa (HEC) utilizado para formar el gel junto con el almidón de yuca, el volumen de etanol y de agua, la velocidad y tiempo de agitación y la temperatura de secado se mantuvieron constantes en los experimentos.

Tabla 1. Variación de los componentes principales en el diseño experimental multifactorial 3^3 utilizado para la formulación de las espumas de celulosa y almidón de yuca.

Componentes	Cantidad		
Celulosa (g)	5	10	15
Almidón de yuca (g)	10	15	20
Dodecil sulfato de sodio (M) (volumen constante = 50 mL)	0,1	0,3	0,5

Se recolectó papel Bond tipo carta (usado y descartado como residuo en oficinas), fraccionando y pesando en una balanza electrónica (*Symmetry Cole-Parmer*) la cantidad requerida para cada formulación. Posteriormente, se colocó en un vaso de precipitado con 100 mL de agua durante 30 min, calentando la mezcla hasta 100°C y filtrando luego de enfriar.

Por otro lado, se preparó un gel con base en almidón de

yuca (99,9% de pureza, fabricado por Inveyuca, empresa mixta de PDVSA Agrícola), 1 g de hidroxietilcelulosa (polímero no iónico derivado de la celulosa, 99% pureza, grado industrial, *Headcel*), 100 mL de agua destilada y 10 mL de etanol absoluto (anhidro, pureza 99,8%, *Sigma*), calentando la mezcla a 60°C hasta la gelificación. Una vez que el gel se enfrió a temperatura ambiente, se procedió a la formulación de la espuma agregando los componentes en un mezclador con aspas tipo cuchilla (*Electrolux*, modelo ABVN410), y agitando a 10.000 rpm durante 5 min.

El procedimiento utilizado se basó en el método estático de Ross-Miller, donde el suministro de la fase gaseosa fue aportado por el aire del ambiente y la espuma se formó al dejar caer el líquido espumante desde cierta altura en un cilindro graduado que contiene cierta cantidad del mismo líquido (Ross 1969); acelerando el proceso mediante agitación rápida de la dispersión sólido-líquido-gas y utilizando una fase sólida dispersada en un gel. Para el secado de las espumas se empleó un horno de bandeja eléctrico (*Memmert*, modelo 854 *Schwabach*). La espuma se colocó en moldes metálicos con fondo de malla y el secado se efectuó por 5 h a 70°C. En la Figura 1 se muestran varias de las espumas formuladas.



Figura 1. Espumas sólidas de celulosa y almidón de yuca.

Caracterización de las espumas sólidas

Se midieron varias propiedades que permitieron caracterizar tanto física como mecánicamente las espumas sólidas, además de seleccionar la formulación más adecuada y con el mayor rendimiento de producción según el diseño experimental establecido; las cuales se especifican a continuación.

Apariencia: se realizó una matriz de criterios de selección simple, ponderando diferentes criterios asociados a las características de apariencia o aspecto de las espumas, tales como: fragilidad, textura, olor y color; comparando con una espuma de papel comercial fabricada por la empresa americana *Orange Total*

Packaging Solution.

Densidad: estimada por la relación masa/volumen. De las muestras de espumas sólidas se obtuvieron probetas con geometría cilíndrica, pesándolas y midiéndoles el diámetro y altura se obtuvo el volumen de la espuma.

Capacidad de absorción de agua: propiedad determinante para la aplicación de la espuma (Villada *et al.* 2008) descrita por Andrade *et al.* (2010) como la técnica “la bolsa de té”, para lo cual se elaboraron empaques de tela (60 mm x 60 mm), pesando cada empaque antes y después de introducir la espuma en éstos y sumergir cada uno en un vaso de precipitado con 300 mL de agua durante 2 h. Luego se retiró el empaque, dejando escurrir (5 min), pesando nuevamente y midiendo la cantidad de agua escurrida. Después de obtener los datos correspondientes, se procedió a determinar el porcentaje de hinchamiento de la espuma (%H) por absorción de agua, previamente calculando un factor de corrección asociado a la bolsa húmeda (F_c) mediante:

$$F_c = \frac{\sum_{i=1}^n (MBh - MBs)_i}{n} \quad (1)$$

donde F_c : factor de corrección; MBh : masa de la bolsa húmeda, MBs : masa de la bolsa seca; n : número de réplicas.

Para el porcentaje de hinchamiento (%H) se empleó la siguiente ecuación (Meneses *et al.* 2010):

$$\%H = \left(\frac{Mf - Mi - Fc}{Mm} \right) 100 \quad (2)$$

donde: Mf : masa de la bolsa con la muestra después del hinchamiento; Mi : masa de la bolsa con la muestra antes del hinchamiento; Mm : masa de la muestra seca antes del hinchamiento.

Estabilidad térmica: medida como la resistencia de las espumas a soportar calentamiento por dos medios físicos. En el primero, se aplicó fuego directo a las muestras con un mechero Bunsen, observando si ocurría emanación de vapores, deformación de la geometría de la espuma o ignición; midiendo el tiempo que tomaba en carbonizarse. En el segundo, las muestras fueron expuestas a calentamiento en una plancha (IKA, modelo C-MAG HP 7), registrando el tiempo y la temperatura en que comenzaba a quemarse la superficie de la espuma.

Resistencia térmica: para esta prueba se empleó un sistema cerrado y aislado, Figura 2, provisto de una fuente de calor, placas de aluminio (1, 2 y 4) y termocuplas para

registrar la temperatura antes (T_1) y después (T_2) de la transferencia de calor hacia y desde la placa de espuma (3); con un registro de la temperatura cada 30 s por un lapso de 27 min (1.620 s).

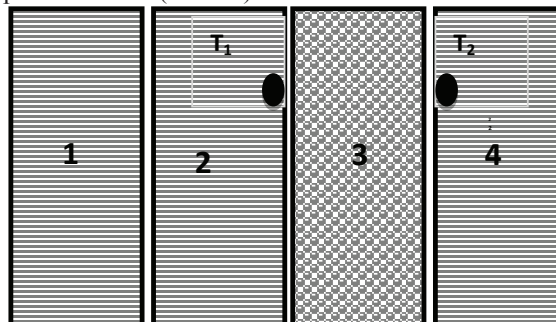


Figura 2. Arreglo de placas de aluminio 1 (6,7 cm x 7,7 cm x 1 cm), 2 y 4 (6,7 cm x 7,7 cm x 0,3 cm) para evaluar capacidad aislante de una placa de espuma sólida 3 (6,7 cm x 7,7 cm x 0,3 cm).

Compresión y deformación mecánica: este ensayo se llevó a cabo mediante el método de compresión simple no confinado, con el cual se determinó la carga y la deformación que puede soportar la espuma sólida de celulosa colocada en una prensa hidráulica industrial.

Porosidad y morfología: la porosidad se determinó con el porosímetro universal *Ruska*, y la estructura morfológica mediante microscopía electrónica de barrido (MEB); las imágenes se obtuvieron con un microscopio con emisión de campo (*Hitachi S-800FE*).

Rendimiento: el rendimiento de producción de la espuma se determinó por la relación entre la masa de la espuma sólida formada y la masa de materia prima principal empleada (celulosa y almidón de yuca).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primera instancia se presenta la relación entre parámetros característicos (densidad y %H) en función del factor de diseño experimental que presentó mayor correlación en la calidad de las espumas, específicamente la cantidad de celulosa; manteniendo los demás factores constantes (Fig. 3). Un incremento en la masa de celulosa (5 a 15 g) generó un incremento en la densidad de la espuma (93 a 207 kg/m³) y una disminución del hinchamiento (900 a 230%). La alta capacidad de absorción de agua se debe al contenido de amilopectina presente en el almidón de yuca (Meneses *et al.* 2007, Hernández *et al.* 2008) y a la alta porosidad en el interior de la espuma creada por las burbujas de aire como fase dispersa. Esta característica las hace ideal para ser usadas como material de embalaje que protege objetos de la humedad por mayor tiempo o de derrames abundantes de líquidos.

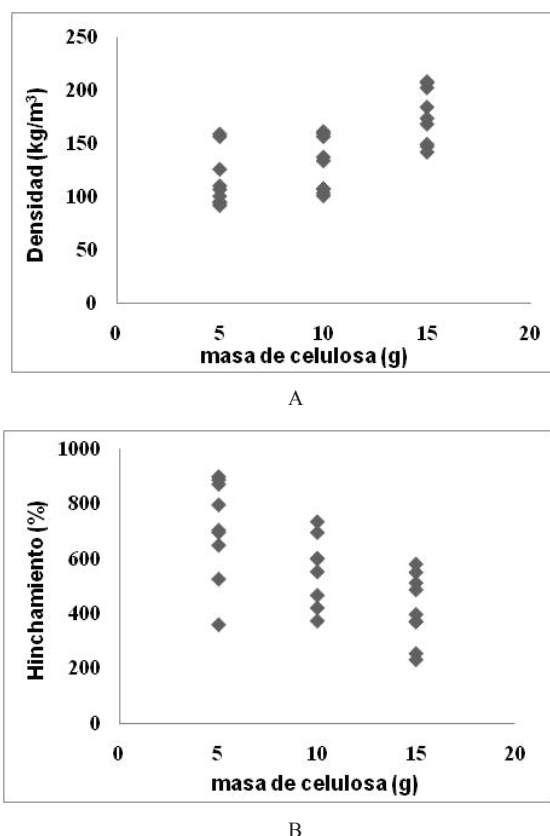


Figura 3. Relación entre los parámetros Densidad (kg/m^3) (A) e Hinchamiento (%) (B) respecto a la masa de celulosa (factor de mayor efecto en el diseño experimental).

El resultado de la matriz de valoración simple, basada en las características de apariencia de la espuma, permitió seleccionar sólo 4 de las 27 formulaciones preparadas (5, 6, 13 y 23 con la mayor puntuación), que presentaron las cualidades deseadas respecto a la espuma comercial de comparación: textura suave que permite la impresión de logos, letras o símbolos; consistencia dura para que no desprenda partículas; sin olor y de color blanco que indica ninguno o pocos residuos de tinta después del tratamiento del papel bond reciclado. De las cuatro formulaciones, la número 23 contenía el mayor porcentaje de celulosa aportado por el desecho, por lo cual se seleccionó para una caracterización física y mecánica de manera más completa.

Características físicas y mecánicas de la espuma seleccionada

Densidad promedio: $173,49 \text{ kg/m}^3$, menor a la densidad de la espuma comercial (190 kg/m^3) lo que resulta ventajoso desde el punto de vista estructural y de carga para el manejo y traslado.

Porosidad promedio: 0,73 volumen de espacios vacíos/volumen total o 73% en términos de porcentaje. Esta alta porosidad le aporta a la espuma resistencia a la compresión y deformación, tal como se evidencia más adelante en los ensayos mecánicos. En la Figura 4 se aprecian los poros al interior de dos secciones de espuma, los cuales no son uniformes en tamaño ni geometría debido al método de preparación para la dispersión del aire en la fase líquida gelificada.

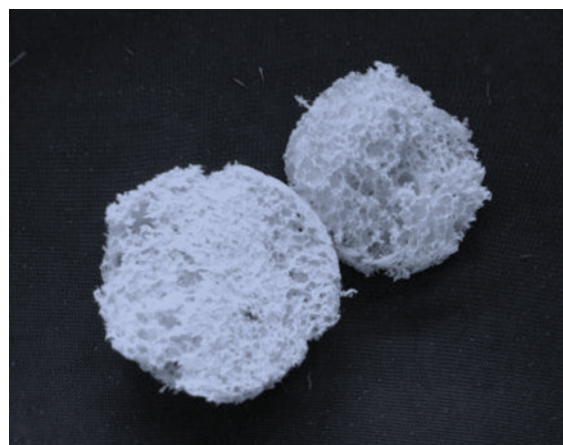


Figura 4. Estructura porosa en el interior de una espuma de celulosa y almidón de yuca.

Resistencia al fuego: la espuma presentó cierta resistencia a la ignición al aplicar llama directa, iniciando la combustión después de 60 s, carbonizándose sin producir llama y conservando la geometría original; tal como se evidencia en la Figura 5 (izquierda). Mediante calentamiento indirecto a través de una plancha de calentamiento, la carbonización superficial se inició al alcanzar 120°C (Fig. 5, derecha), sin llegar a quemarse toda la superficie del material. Estos resultados de inflamabilidad clasifican la espuma como material autoextinguible y se debe a la presencia del almidón de yuca que retarda el proceso de combustión y a la presencia de las burbujas de aire que actúan como aislantes del calor.



Figura 5. Estado final de la espuma sólida de celulosa, luego de aplicar la prueba de resistencia al fuego mediante calentamiento directo (izquierda) e indirecto (derecha).

Resistencia térmica: en la Figura 6 se presentan los dos perfiles de temperatura obtenidos mediante el registro de esta variable por las termocuplas colocadas antes (T_1) y después (T_2) de la placa de espuma en el sistema diseñado para tal fin (Fig. 2). La temperatura T_1 aumenta considerablemente con el tiempo (37 a 88°C) debido a la transferencia de calor a través de las dos placas de aluminio colocadas antes de la placa de espuma, mientras que la temperatura T_2 varía poco (32 a 44°C) a medida que se transfiere parte de ese calor a través de la placa de espuma hasta la tercera placa de aluminio; lo cual evidencia la capacidad aislante de la espuma en un intervalo de tiempo de 1.800 s (30 min). Esto es atribuido a la naturaleza de sus componentes y a la estructura porosa que interrumpe y reduce el flujo de calor; en la literatura se han reportado valores de conductividades térmicas en el rango 0,034-0,069 W/m·K para espumas de celulosa (Bird *et al.* 2007, IVE 2011).

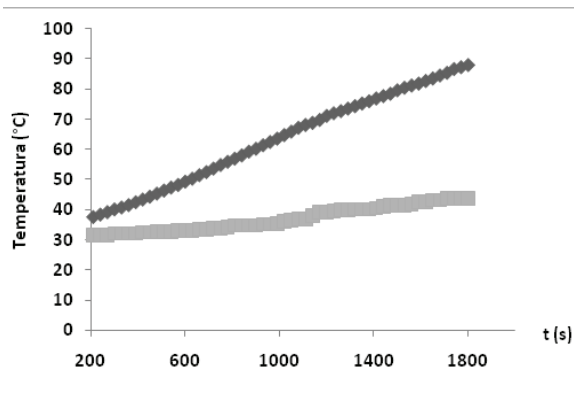


Figura 6. Perfiles de temperatura T_1 y T_2 en función del tiempo de transferencia de calor a través de la placa de espuma sólida formada por celulosa y almidón de yuca.

Compresión y deformación: en la Tabla 2 se presentan los resultados del ensayo de compresión de cuatro muestras de una espuma, indicando la carga máxima que puede soportar (kg/cm^2) y la deformación

(cm) ocasionada por la carga. En este caso, la presencia del almidón de yuca determina las propiedades mecánicas de la espuma (Debiagi *et al.* 2011).

Tabla 2. Deformación y carga que soporta la espuma sólida mediante compresión simple en una prensa hidráulica.

Muestra	Deformación (cm)	Carga (kg/cm^2)
1	0,89	3,87
2	0,64	3,86
3	0,74	3,64
4	0,92	4,61
Promedio	0,80	3,99

Las muestras analizadas no presentaron fractura después de la compresión ni elasticidad; el material no regresó a su estado inicial. La espuma puede soportar una carga de 3,99 kg/cm^2 de área en promedio y esta carga ocasiona una deformación del 20% de su altura original; evidenciando la capacidad de amortiguación de la espuma sin sufrir daños en su estructura.

Morfología de la espuma por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

En la Figura 7 se muestran las micrografías obtenidas por análisis MEB de la espuma seleccionada. En la 7A se observan las fibras de celulosas entrecruzadas. La 7B y 7C muestran un acercamiento que permite identificar una microestructura más compleja, conformada por una trama expandida debido a la deposición de las escamas de almidón sobre las fibras entrecruzadas de celulosa. Esta configuración permite explicar el aporte de los almidones en la resistencia a la compresión encontrada en la espuma elaborada (Tabla 2) y referida por otros autores (Meneses *et al.* 2007, Debiagi *et al.* 2011), debido a que las microestructuras de interconexión entre la celulosa y el almidón se distribuyen y disipan el esfuerzo mecánico.

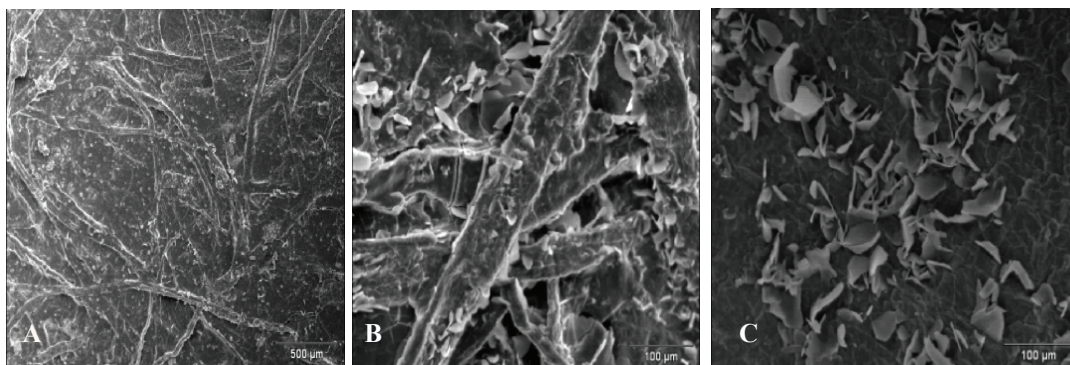


Figura 7. Micrografía de la espuma de celulosa: (A) fibras de la celulosa entrecruzadas (B) almidón de yuca en forma de hojuelas adherido sobre la celulosa, (C) configuración y adherencia entre los componentes principales de la formulación.

En la Figura 7C se detallan los gránulos del almidón en forma de hojuelas, con tamaños variados que llegan a superar los 50 μm . Esto último puede relacionarse con el alto porcentaje de hinchamiento por absorción con agua debido a la exposición de almidón, altamente higroscópico, en la superficie; así como también al entrecruzamiento del almidón y las fibras de celulosa que aumenta la exposición de éstas a la infiltración del agua y a una mejor interacción con la matriz del material. No obstante, el hecho que las hojuelas de almidón no presenten un orden específico de deposición sobre el plano, contribuyen con el carácter isotrópico de la espuma que favorece las propiedades de compresión analizadas.

CONCLUSIONES

Las espumas sólidas formuladas con base en celulosa de papel Bond usado y almidón de yuca de producción nacional representan una alternativa viable para el desarrollo de nuevos productos, tanto por el reciclaje de desechos celulósicos como por su aporte a economías ecoambientales. El rendimiento de producción de la espuma fue de 33% y por sus características físicas, mecánicas y estructurales puede ser utilizada en diversas aplicaciones comerciales, tanto por su carácter de aislante térmico (aisla hasta 50°C) como por su propiedad autoextinguible y alta capacidad para retener humedad (hasta 900%) y amortiguar cargas (4 kg/cm² aprox.). La mejor formulación obtenida en el diseño experimental planteado permitió incorporar la mayor cantidad de papel Bond reciclado en el producto acabado.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al personal docente y técnico de los siguientes laboratorios de la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas del Núcleo de Anzoátegui: *Sistemas Dispersos y Ambiente* del Departamento de Ingeniería Química, *Ingeniería Mecánica IV* del Departamento de Ingeniería Mecánica, *Yacimientos* del Departamento de Ingeniería de Petróleo y *Mecánica de Suelos* del Departamento de Ingeniería Civil. Al Instituto de Investigaciones en Biomedicina y Ciencias Aplicadas “Dra. Susan Tai” (IIBCA-UDO) y a la Comisión de Investigación de la Universidad de Oriente. También un agradecimiento a la empresa Inveyuca, de PDVSA Agrícola, por facilitar el almidón de yuca.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE D, GARCÍA D, INCIARTE H, GONZÁLEZ I, SOTO D, OLIVA H. 2010. Síntesis y caracterización de hidrogeles basados en ácido maleico y acrilamida. *Rev. Iberoam. Polím.* 11(1):1-16.
- BIRD R, STEWARD W, LIGHTFOOT E. 2007. *Transport Phenomena*. 2nd ed., John Wiley & Sons: Limusa, pp. 905.
- BUSTOS C. 2009. La problemática de los desechos sólidos. *Economía*. 34(27):121-144.
- DEBIAGI F, MALI S, EIRAS GROSSMANN M, YAMASHITA F. 2011. Biodegradable Foams Based on Starch, Polyvinyl Alcohol, Chitosan and Sugarcane Fibers Obtained by Extrusion. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 54(5):1043-1052.
- HERNÁNDEZ M, TORRUCO J, CHEL L, BETANCUR-ANCONA D. 2008. Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Rev. Cienc. Tecnol. Aliment.* 28(3):718-726.
- IVE (INSTITUTO VALENCIANDO DE EDIFICACIÓN). 2011. *Productos y Materiales: Propiedades de aislantes térmicos para rehabilitación energética. Cuadernos de Rehabilitación P1-3*. Publicación periódica del Instituto Valenciando de Edificación, España. Disponible en línea en: <http://www.five.es> (Acceso 06.10.2013)
- MENESES J, CORRALES C, VALENCIA M. 2007. Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca. *Rev. Esc. Ing. Antioq.* 8:57-67.
- REOLON V, LAURINDO J. 2010. Characterization of foams obtained from cassava starch, cellulose fibres and dolomitic limestone by a thermopressing process. *Braz. Arch. Biol. Technol.* 53(1):185-192
- ROSS S. 1969. Bubbles and foams-New general law. *Ind. Eng. Chem.* 61(10):48-57.
- TORRES F, DÍAZ D, AMAYA J, TORRES C, TRONCOSO O. 2008. Desarrollo de envases y embalajes biodegradables y compostables para la mejora de la competitividad agroindustrial. Informe del Fondo de Innovación, Ciencia y Tecnología de Perú, Lima.
- VILLADA H, ACOSTA H, VELASCO R. 2008. Investigación de almidones termoplásticos precursores de productos biodegradables. *Rev. Inform. Tecn.* 19(2):3-14.