

# REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

Año 18 N° 71

Julio - Septiembre de 2008

ISSN 0121-5132

Uso de materiales reciclados para edificaciones: estudio del concreto hidráulico con adición de tiras de caucho de desecho de llanta

Tercera faceta de la logística: la focalizada

Modelo de un sistema de gestión de residuos sólidos para organizaciones

Agrupamiento difuso para investigar información asimétrica: una aplicación a la utilización de los servicios de salud

El aprendizaje situado como una alternativa en la formación de competencias en ingeniería (Segunda parte)



Publicación admitida por Colciencias en el Índice Nacional de Publicaciones Seriadas, Científicas y Tecnológicas colombianas -Publindex- Clasificación tipo C

TARIFA POSTAL REDUCIDA No. 2008-107  
SERVICIOS POSTALES NACIONALES S.A.  
VENCE 31 DE DICIEMBRE DE 2008



ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

# El conocimiento y las ventajas

JOAQUÍN ORAMAS LEURO  
Vicerrector Académico

Las organizaciones que desean desempeñar un papel significativo en la sociedad del conocimiento, durante la era de la información actual, se enfrentan al reto de hallar la manera de gestionar el conocimiento. Se tiene conciencia clara de la importancia que para éstas representa dicha labor, pero no se ha llegado aún a determinar la forma de desarrollar tal gestión. Se ha encontrado que una aproximación a la solución del problema está muy cerca de contar con una estructura de la organización que, tomando en cuenta el conocimiento, complementa los procesos de misión crítica e, incluso, los de registro y control.

La presión de la competencia en un mundo globalizado, que hace que las empresas e instituciones desarrollen su actividad en un entorno donde se ha superado la competencia de precios, del dominio de los factores de producción –y aun el de la calidad–, y donde prevalecen la creatividad y la innovación, convierte en un imperativo la gestión del conocimiento.

Los intentos de estructura organizacional centrada en el conocimiento, que se han caracterizado por estar orientados a reflejar la estructura del conocimiento, lamentablemente no han tenido mayor éxito.

La tendencia actual está dirigida más a estructurar la organización en función del conocimiento, que a tratar de estructurar el conocimiento para reflejarlo en la organización. En general, se propende a estructurar las empresas e instituciones en función de lo que se sabe, y lo que se sabe hacer, como fuente primaria y fundamental de la competitividad.

El conocimiento basado en los hechos es la fuente de la competitividad de las instituciones, ya que éste le proporciona la posibilidad de la innovación y, por tanto, de las ventajas que le garantizan la sostenibilidad a largo plazo, el crecimiento, y les permite evitar el papel de seguidores que focalizan sus energías a la supervivencia.

Al conocimiento a que se hace referencia trasciende el conocimiento científico para incluir el denominado “vulgar” o de la vida cotidiana, que es sensitivo, subjetivo y superficial, carece de estructura sistémica y se adquiere mediante la observación y la vivencia de los hechos. Por estas características se requieren sistemas no tradicionales para convertirlo en un activo intelectual de las organizaciones difícil de conservar, pero estratégico por cuanto es difícil de imitar.

Los activos intelectuales –y por tanto intangibles– se fundamentan en la información, el aprendizaje y el conocimiento basado en los hechos, y se resumen en el llamado aprendizaje organizativo que tiene como elemento principal el trabajo en grupo, que si se logra sistematizar permite resolver problemas cada vez más complejos.

En resumen, toda organización debe buscar formas efectivas de gestionar el conocimiento como vía para generar valor para la organización y, por consiguiente, para el producto o servicio resultante del desarrollo de los propósitos misionales.

Dicho conocimiento, producto de la observación de los hechos, tiene su génesis en el conjunto de datos que, de manera estructurada o no, y sistémica o no, permiten hacer abstracción de éste y que, estructurados, se convierten en

---

información. La información asociada a un contexto, a las experiencias y a las vivencias de una persona se convierte en conocimiento. Este conocimiento, asociado al saber hacer de un conjunto de personas, se convierte en sabiduría. Finalmente, cuando la organización se apropia del conocimiento para mejorar y potenciar sus capacidades, se convierte en capital intelectual.

Esta necesidad imperiosa de gestionar adecuadamente el conocimiento dentro de las organizaciones es la preocupación de las empresas industriales, comerciales y de servicios, cuyos objetivos misionales distan mucho de estar centrados en el conocimiento. Surge, entonces,

la siguiente pregunta: ¿qué está pasando en las organizaciones cuyo objetivo misional está centrado en el conocimiento? Su estructura orgánica puede continuar aferrada a las disciplinas o divisiones aristotélicas o baconianas de la ciencia, y desaprovechar la posibilidad de generar las ventajas competitivas producto de la sinergia del trabajo en grupo, donde además de compartir el conocimiento científico se pueda crear y consolidar el conocimiento vulgar sobre cómo desarrollar procesos de transferencia, creación, adaptación y aplicación de conocimiento.

# Uso de materiales reciclados para edificaciones: estudio del concreto hidráulico con adición de tiras de caucho de desecho de llanta

ÓSCAR OVIEDO

ooviedo@javeriana.edu.co.  
Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana.

ROGER BUENDÍA

rbuendia@javeriana.edu.co.  
Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana.

DANIEL RUIZ

daniel.ruiz@javeriana.edu.co.  
Ingeniero civil y MSc. en ingeniería estructural y sísmica. Jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos, profesor asociado e investigador del grupo Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

ADRIANA GÓMEZ

adrianagomez@javeriana.edu.co.  
Ingeniera civil. Jefa de la sección de Construcción, profesora instructora e investigadora del grupo Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

MARÍA LEÓN

mpleon@javeriana.edu.co.  
Ingeniera civil y MSc. en infraestructura vial y pavimentos. Ingeniera de calidad del Laboratorio de Pruebas y Ensayos, profesora instructora e investigadora del grupo Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

Artículo recibido: 21/04/2008  
Evaluación: 25/04/2008  
Aprobado: 30/05/2008

## Resumen

Las llantas de caucho desechadas son un problema ambiental, ya que el material tiene una vida de cientos de años pero se usa en vehículos tan sólo por un lustro, razón por la cual es necesario buscar nuevos materiales o procesos en los que se pueda reutilizar el caucho de las llantas. Recientemente se creó el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, el cual regulará la adaptación del sistema de certificación de edificaciones sostenibles LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), a las condiciones colombianas. Entre los aspectos evaluados por el LEED (y acorde con el interés mundial en la sostenibilidad) está el empleo de materiales reciclados en la construcción. Dado que el concreto hidráulico se usa masivamente, en este estudio se analiza el comportamiento del concreto adicionado con partículas de llantas desechadas. La investigación se realizó en dos etapas. En la primera se elaboraron mezclas de concreto adicionadas con caucho al 5, 10 y 15% en volumen del agregado grueso. Luego, con base en la resistencia a la compresión ( $f'c$ ), se escogió la mezcla del 10%, a la que se le determinaron propiedades mecánicas (dinámicas y estáticas). Con

estas propiedades se hizo un diseño estructural de una vivienda de dos pisos. Basados en los resultados obtenidos, el concreto al ser adicionado mejora la ductilidad (al desplazamiento), disipa mayor energía y resiste la propagación de fisuras. Sin embargo, la mezcla adicionada con caucho requiere un 10% más de pasta de cemento para garantizar la resistencia de diseño y el asentamiento de la mezcla en estado fresco.

**Palabras claves:** concreto, partículas de caucho de desecho de llanta, ensayos de laboratorio, materiales reciclados, sostenibilidad.

## Abstract

The waste rubber tires is an environmental problem since the material has a life of hundreds of years but it is used in vehicles only by five years. Therefore it is necessary to look for new materials or processes, in which the rubber of the tires can be reused. Recently it was created the Colombian Council of Sustainable Construction which will regulate the adaptation of the system of certification

of sustainable constructions LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), to the Colombian conditions. Within the aspects evaluated by LEED (and in agreement with the worldwide interest in the sustainability) is the use of recycled materials in the construction. Since the hydraulic concrete is used massively, in this study is analyzed the behavior of the concrete with waste rubber tire particles.

The research was realized in two stages. In the first stage the concrete mixtures were added with rubber to 5, 10 and 15% in volume of the aggregate. Then, and based on the compressive strength ( $f'c$ ), the mixture of 10% was chosen and its mechanical properties (dynamic and static) were determined. With these properties a structural design of a two floors house of was realized. Based on the results, the concrete mixtures added with rubber improves the ductility (displacement), dissipates energy, and it resists the propagation of fissures. Nevertheless concrete mixture added with rubber requires 10% more of cement and water to guarantee  $f'c$  and the slump of the mixture in fresh state.

**Keywords:** concrete, waste rubber tire particles, laboratory test, recycled materials, sustainability.

## INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN

Recientemente se creó el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, organización que agrupa a nivel nacional a todas las empresas, entidades y profesionales que trabajan para la transformación del sector de la construcción hacia la sostenibilidad, y que además forma parte del Consejo Mundial de Construcción Sostenible (WorldGBC). Por medio de esta entidad, se regulará la adaptación del sistema de certificación de edificaciones sostenibles LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), a las condiciones colombianas.

La certificación LEED promueve la construcción de espacios sostenibles, que respondan a la crisis ambiental y tomen en cuenta el impacto de la industria de la construcción en el problema global. El diseño sostenible ocasiona no solamente impactos positivos en la salud pública y en el medio ambiente, sino que también se ve representado en una reducción de costos y mejora de la comercialización de los proyectos.

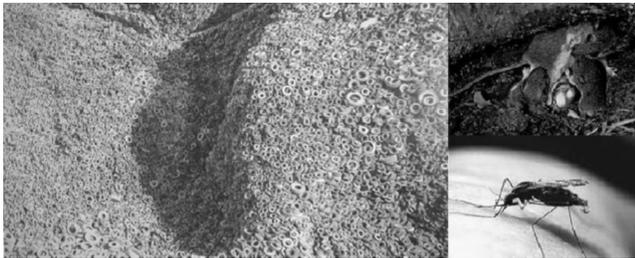
Esta es una certificación voluntaria, aplicable a edificaciones nuevas o existentes, de vivienda o comerciales, así como a envolvente de edificaciones y a centros educativos; actualmente en Estados Unidos se incluyen cinco capítulos: sitios sostenibles, ahorro de agua, energía y medio ambiente, materiales y recursos y calidad de aire. LEED considera un sistema de puntuación conformado por prerrequisitos y créditos en cada capítulo.

El capítulo de materiales y recursos en la versión LEED 2.2 (vigente actualmente) busca potencializar el reciclaje, reutilizar edificaciones y materiales existentes, usar materiales renovables y reciclados, y reducir la energía en transporte de materiales. El total del capítulo corresponde a trece puntos posibles, de los cuales dos se pueden obtener por utilizar materiales con contenido reciclado en la edificación. En el sistema de calificación se propone que la suma del contenido de material reciclado de posconsumo (desechos generados en hogares o en instalaciones comerciales, industriales e institucionales, que no pueden emplearse de nuevo para el uso inicialmente propuesto), más la mitad del contenido de material reciclado de preconsumo (desechos generados durante el proceso de manufactura), sea por lo menos el 20% de los costos de los materiales para obtener dos puntos.

De acuerdo con el anterior panorama, aunque en Colombia se consiguen algunos productos con contenido reciclado, se considera importante centrar la investigación en la creación de nuevos materiales que potencialicen dicho aspecto, tema central de esta investigación.

Teniendo en cuenta que el renglón de las estructuras en concreto en los presupuestos de proyectos representa un valor elevado, el incluir materiales reciclados en este ítem garantizaría el éxito en la implementación de dicho crédito y se brindaría una excelente oportunidad de emplear los desechos de llanta, los cuales ocasionan un problema ambiental que se describe a continuación.

Las llantas son elementos fabricados masivamente a nivel mundial, con una producción en crecimiento a causa del auge automotor de los últimos años. La llanta es un toroide constituido por caucho, que soporta aire comprimido y es capaz de resistir más de 50 veces su peso. Está compuesta por distintos materiales que pueden durar más de 600 años antes de biodegradarse. Los materiales que componen las llantas son vulcanizados durante el proceso de producción, lo cual hace imposible que se aprovechen nuevamente las materias primas que las componen, ya que no existe la posibilidad de revertir el proceso. El principal componente de las llantas es el caucho (alrededor del 40%), ya sea natural o sintético, pero además posee un encordado en malla de acero y fibra textil (Proarca y Sigma, 2004).



**Figura 1.** Apilamiento de llantas y plagas que trae consigo (Domingo, Salazar y Doreen, 2004).

Las llantas en su estado normal y a temperatura ambiente no representan un residuo peligroso, pero su forma, composición, cantidad y fabricación las convierten en un problema sanitario. Según Silva Campos (2006), en los países industrializados se desechan 9 kg de llantas por habitante cada año.

El apilamiento de las llantas en depósitos al aire libre ha sido la disposición más utilizada históricamente, pero esto trae problemas como la proliferación de mosquitos y de enfermedades. La disposición en rellenos sanitarios no es una buena opción, ya que las llantas son difíciles de compactar, ocupan un gran volumen y tienden a subir a la superficie.

Según Domingo, Salazar y Doreen (2004), la práctica más peligrosa para deshacerse de las llantas es quemarlas, debido a que varios de los elementos que las componen son derivados del petróleo, y al incinerarse se generan residuos aceitosos que afectan el suelo y el agua freática, además de que esta quema genera emisiones de gases que contienen contaminantes cancerígenos y mutagénicos. Es importante mencionar que a altas temperaturas de incineración los gases emitidos no son tóxicos, razón por la cual las llantas se han usado como combustible en empresas dedicadas a la producción de cemento, como se ilustra en la referencia (Quezada y Dennis, 2001).

### CONCRETO ADICIONADO CON CAUCHO

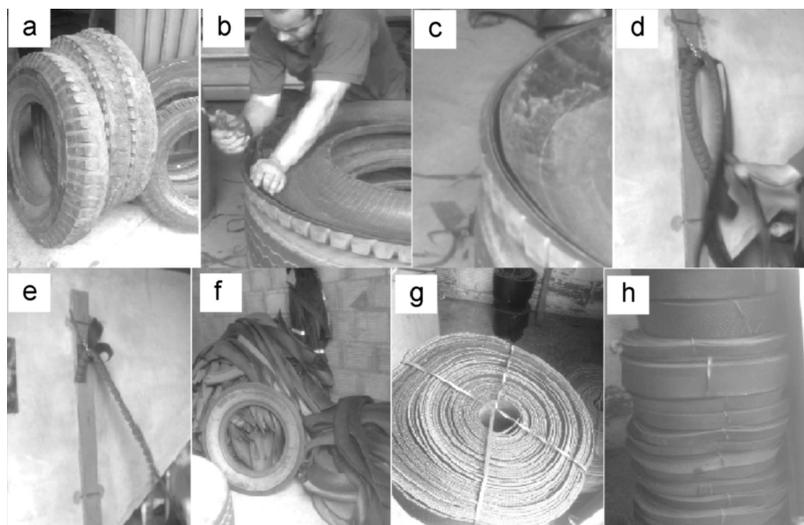
El concreto, uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo, es ideal para masificar el uso de los desechos de llanta como agregado de tal material. Por esto se han realizado diversos estudios experimentales del concreto (hidráulico y asfáltico, aunque sobre todo hidráulico) adicionado con caucho de llanta, como se reporta en Topcu (1995, 1997), Guo-

qiang et al. (2004), Hernández-Olivares (2002), Segre y Joeques (2000), Zheng, Sharon y Yuan (2007), Cairns, Kew y Kenny (2004), Garrick (2004), Tantal, Lepore y Zandi (1996), Toutanji (1996), e investigaciones del grupo Cecata, de la Pontificia Universidad Javeriana. Estos autores han agregado caucho remplazando el agregado pétreo en diferentes proporciones (desde 1% hasta 100%) y usando tiras de caucho de diferentes formas (*chips* y tiras). En los estudios se han evaluado las propiedades físicas y mecánicas (estáticas y dinámicas) de las mezclas en estado endurecido. En general, los autores reportan que a medida que se agrega más caucho tanto a mezclas de concreto asfáltico como hidráulico, la resistencia a la compresión, la resistencia a la tensión, el módulo de rotura y el módulo de elasticidad decaen, pero aumenta la plasticidad y con esto su nivel de disipación de energía; así mismo, el asentamiento de mezclas de concreto hidráulico en estado fresco (cuando se reportó) también disminuye. Sin embargo en las referencias consultadas no se encontró ninguna propuesta precisa de aplicación de las mezclas estudiadas y tampoco se hallaron estudios en los que se conservara el asentamiento como una variable constante para las mezclas de concreto hidráulico. Cabe recordar que el asentamiento y la resistencia a la compresión son las variables más importantes en el diseño de mezclas de concreto hidráulico.

### DISEÑO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Dentro de esta investigación se adicionó caucho de llantas en forma de tiras recubiertas en cemento, como lo proponen Guoqiang et al. (2004). Para el figurado de las tiras de caucho (T.C.), se tomó como materia prima el desecho de las zonas laterales de las llantas de camiones, los cuales poseen mallas en fibra textil. Este proceso lo realizó directamente una empresa del sector productivo que usa los desechos de llantas para la fabricación de muebles. Dicha empresa comercializa bandas de caucho de aproximadamente 5,5 m de largo por 50 mm de ancho y 2 mm de espesor. Cabe anotar que a este producto no se le hace ninguna clase de proceso químico, sólo se lava la llanta previamente con agua y luego se enrolla y almacena el producto (figura 2).

Las dimensiones de las T.C. utilizadas fueron de 50 mm de largo, 4 mm de ancho y 2 mm de espesor, las



**Figura 2.** Proceso de obtención de bandas de caucho de desecho de llanta. a) Llantas de camiones. b) y c) Detalle de corte de las franjas laterales de las llantas. d) y e) Retiro de las bandas de caucho de las zonas laterales de las llantas. f) y g) Almacenamiento y empaquetado de las bandas. h) Bandas de caucho listas para despacho.

cuales se cortaron en una troqueladora hasta obtener las tiras de la figura 3a). Posteriormente se recubrieron las tiras de caucho con una lechada de cemento hidráulico (figura 3b), sometiendo las fibras a un proceso de curado por aspersión con agua durante tres días. Este último procedimiento se hizo con dos fines específicos: proporcionar mejor adherencia entre las tiras de caucho y la mezcla de concreto, y permitir una mejor distribución de las tiras en las mezclas, dado que el peso específico del material sin recubrimiento es muy bajo y puede generarse segregación.

En la primera etapa del diseño de mezclas se realizó la caracterización básica de los materiales según las normas técnicas colombianas (NTC). Para el agregado



**Figura 3.** a) Tiras de caucho de 50 mm x 4 mm x 2 mm (T.C.). b) Mezclado de las tiras de caucho con pasta de cemento.

grueso se efectuaron los ensayos de granulometría (NTC-77), masa unitaria (NTC-92), peso específico y absorción (NTC-176). Para el agregado fino se llevaron a cabo los ensayos de granulometría (NTC-77), masa unitaria (NTC-92), peso específico y absorción (NTC-237). Al cemento se le hizo el ensayo de peso específico (NTC-221).

Con estas propiedades de los materiales, se realizó el diseño de mezcla del concreto testigo (CAU 0%) considerando los siguientes parámetros:

- Consistencia media-húmeda, asentamiento de 4".
- Tamaño máximo de 1" y tamaño máximo nominal de 3/4".
- Contenido de aire escogido del 2%.
- Resistencia de diseño ( $f^{\prime}cr$ ) de 245 kg/cm<sup>2</sup>.
- Relación agua/cemento de 0,45.

Una vez diseñada la mezcla de referencia (CAU 0%, sin adición de caucho indicada en la tabla 1) y ensayada a los 28 días, se procedió a realizar el diseño de las mezclas con T.C. Para estos diseños se hizo una variación del contenido de T.C. en remplazo de un porcentaje en volumen del agregado grueso en cantidades de 5% (mezcla CAU 5%), 10% (mezcla CAU 10%) y 15% (mezcla CAU 15%). Con base en lo anterior se obtuvieron las cantidades (en volumen)

para las mezclas indicadas en la tabla 2. Es importante hacer dos observaciones con respecto a los datos de la tabla 2: en primer lugar, la cantidad de T.C. indicada es el porcentaje (0, 5, 10 o 15%) de la suma de agregado grueso más caucho de cada mezcla (por ejemplo, en la mezcla CAU 5% la cantidad de T.C., 0,018 m<sup>3</sup>, es el 5% de 0,345 m<sup>3</sup> más 0,018 m<sup>3</sup>), y en segunda medida, las cantidades indicadas se deben analizar considerando que se mantuvo el asentamiento constante, por lo que las mezclas adicionadas tienen mayor contenido en pasta de cemento. Este asentamiento constante es un elemento diferenciador de la presente investigación con respecto a las referencias consultadas.

**Tabla 1**  
Diseño de mezcla CAU 0%

Material	CAU 0%		
	Peso (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
Cemento	367,9	2.949,3	,125
Agua	195,0	1.000,0	,195
Aire	-	-	,020
Ag	903,4	2.460,1	,367
Af	754,2	2.554,2	,295
Total	2.220,4		,002

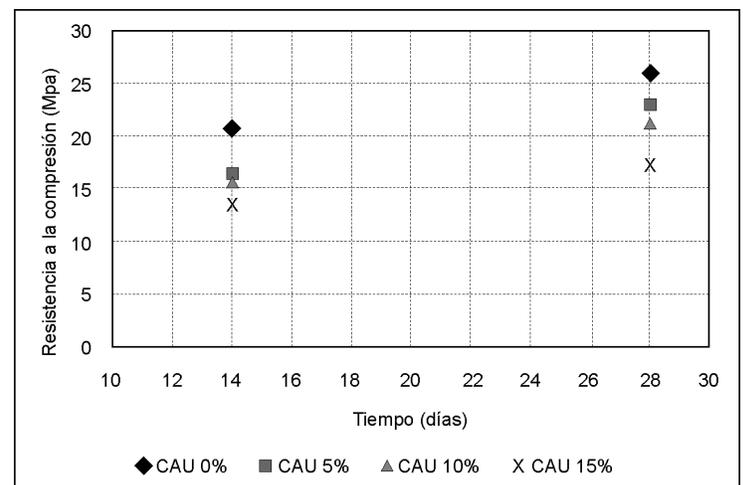
**Tabla 2**  
Cantidades en volumen de las mezclas con adición de caucho y sin ella

Material	CAU 0%	CAU 5%	CAU 10%	CAU 15%
	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Cemento	0,125	0,128	0,134	0,141
Agua	0,195	0,200	0,210	0,220
Aire	0,020	0,020	0,020	0,020
Ag	0,367	0,345	0,318	0,293
Af	0,295	0,292	0,284	0,277
Ac	0,000	0,018	0,035	0,052
Total	1,002	1,003	1,001	1,003

Donde Ag: Agregado grueso, Af: Agregado fino, Ac: Adición de caucho.

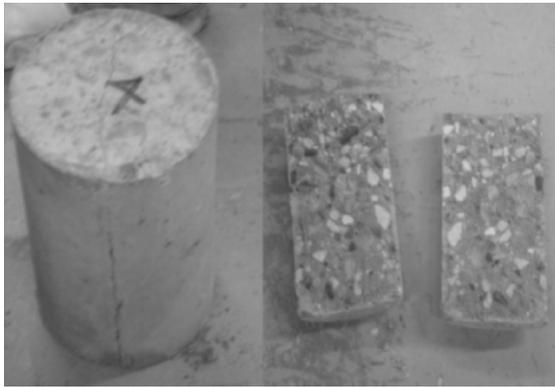
Luego de tener las cantidades para cada diseño, se mezclaron, curaron y vaciaron las mezclas según la NTC-550. Posteriormente se realizaron ensayos de resistencia a la compresión (NTC-673) para las cuatro mezclas (CAU 0%, CAU 5%, CAU 10%, CAU 15%) para las edades de 14 y 28 días. Se fallaron tres cilindros

de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para cada edad y para cada mezcla, con el fin de promediar los valores obtenidos de resistencia a la compresión. Dichos resultados se presentan en la figura 4. Obsérvese que la resistencia a la compresión disminuye con la adición de caucho para ambas edades. La resistencia a la compresión a los 28 días de las mezclas CAU 5%, CAU 10%, CAU 15% fue de 88, 81 y 62%, con respecto a la mezcla testigo, CAU 0%. Por otro lado, la falla de los cilindros de la mezcla CAU 0% fue súbita y explosiva, mientras que la de las mezclas adicionadas fue gradual y no explosiva debido a que las tiras de caucho mantienen las partes unidas aun después de haber fallado (figura 5). Teniendo en cuenta que el propósito de la investigación era usar el concreto en sistemas estructurales, se escogió la mezcla que contenía 10% de agregado de tiras de caucho de llanta (CAU 10%), ya que presentó una resistencia de 21 MPa a los 28 días. Esta resistencia es la usada típicamente en aplicaciones estructurales.



**Figura 4.** Resistencia a la compresión de las mezclas con diferentes porcentajes de adición de desecho de caucho de llanta.

Así mismo se estableció la reducción del peso específico de las mezclas con el incremento de caucho. De acuerdo con las pruebas de laboratorio, la mezcla testigo (sin adición de caucho) tuvo un peso específico de 2.292 kg-f/m<sup>3</sup> y las mezclas adicionadas con caucho presentaron una reducción hasta del 17% (figura 6).



a) b)

Figura 5. Cilindros ensayados a tensión para las mezclas a) CAU 10% y b) CAU 0%.

Teniendo en cuenta los anteriores resultados, sobre las mezclas CAU 0% y CAU 10%, se hicieron ensayos adicionales de módulo de elasticidad (NTC-4025), tensión indirecta (NTC-722), módulo de rotura (NTC-2871), ensayo de flexión dinámica y adherencia. Para cada mezcla y para cada ensayo se efectuaron cuatro repeticiones.

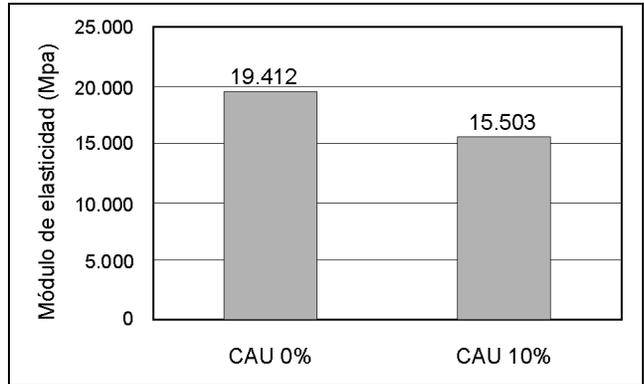


Figura 7. Módulo de elasticidad para la mezcla testigo y para la adicionada con caucho al 10%.

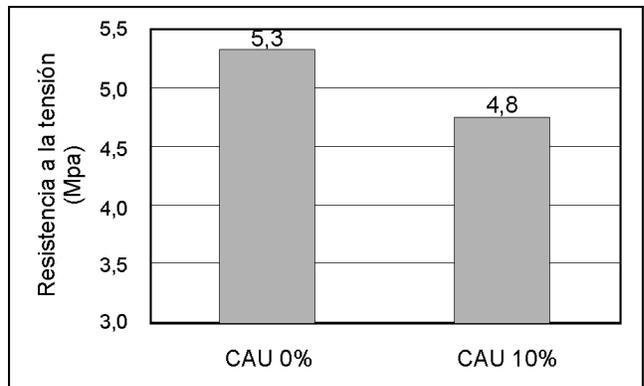


Figura 8. Resistencia a la tensión para la mezcla testigo y para la adicionada con caucho al 10%.

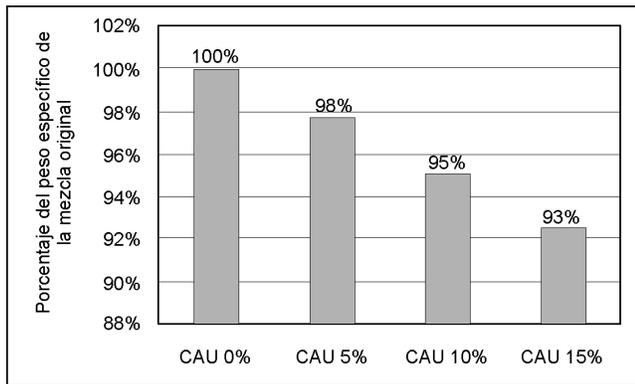


Figura 6. Porcentaje de disminución del peso específico de las mezclas adicionadas con respecto a la mezcla testigo (CAU 0%).

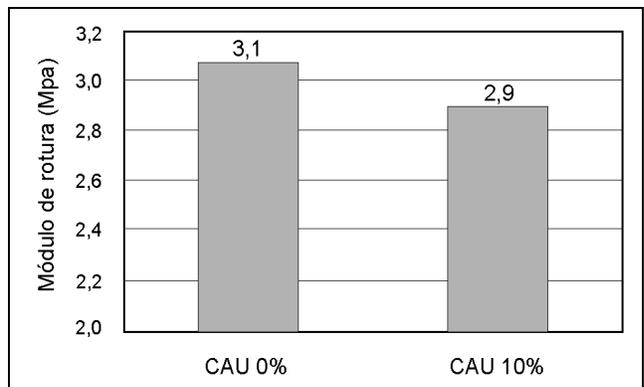


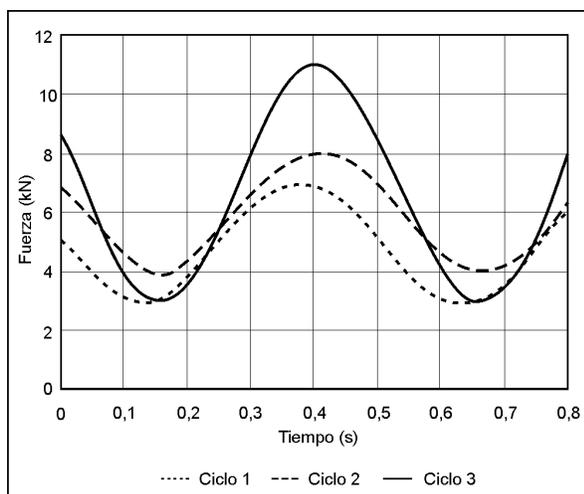
Figura 9. Módulo de rotura para la mezcla testigo y para la adicionada con caucho al 10%.

Los resultados principales de las tres primeras pruebas mencionadas en el párrafo anterior se muestran en las figuras 7, 8 y 9.

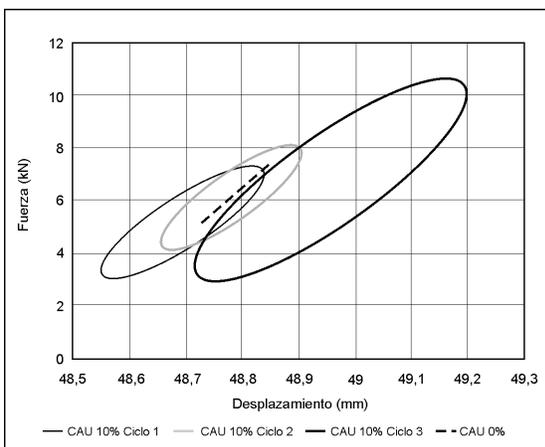
El módulo de elasticidad de la mezcla con 10% de adición de caucho de llanta se redujo en un 20%. Del anterior ensayo vale la pena mencionar que la tendencia de la curva esfuerzo-deformación de los cilindros de la mezcla CAU 10% sigue siendo lineal, a pesar de

tener una adición importante de caucho. Por su parte, la resistencia a la tensión de la mezcla adicionada con caucho se redujo en un 11%, con respecto a la mezcla testigo. De este ensayo se anota que los dos fragmentos resultantes de la mezcla CAU 0% luego de la falla se separaban inmediatamente, mientras que en los cilindros de la mezcla CAU 10% permanecían unidos (similar a los resultados reportados por Guoqiang et al., 2004). Por último, para el ensayo de módulo de rotura, la resistencia a la tensión por flexión de la mezcla CAU 10% fue 6% inferior al de la mezcla base CAU 0%.

Para el ensayo de flexión dinámica se usó el mismo montaje que el de flexión estática con carga al centro de la luz, pero aplicando la carga con un actuador dinámico marca MTS®. Los ensayos se realizaron por control de fuerza, aplicando fuerzas sinusoidales con las variaciones indicadas en la figura 10.



**Figura 10.** Historias de fuerza vs. tiempo aplicadas durante los ensayos de flexión dinámica.



**Figura 11.** Ciclos de histéresis de los ensayos de flexión dinámica.

Con este esquema de ensayo se obtuvieron los ciclos de histéresis indicados en la figura 3.11.

De las gráficas anteriores se deduce que la mezcla sin caucho CAU 0%, se comporta como un material elástico (para las cargas aplicadas), puesto que al someterla a cargas dinámicas no presenta deformaciones permanentes. En cambio, la mezcla CAU 10% se comporta inelásticamente, presentando deformaciones permanentes sin fallar. Esto le da propiedades de disipación de energía, mayor amortiguamiento con respecto al crítico e importante capacidad de deformación en el rango inelástico. Esta conclusión es similar a los resultados reportados por Topcu (1995). De acuerdo con las estimaciones realizadas, el amortiguamiento histérico equivalente del concreto adicionado es cercano al 10% para las cargas máximas aplicadas.

Por otro lado, para verificar la adherencia entre el concreto adicionado con fibras y el acero con fines de diseño estructural se realizó el ensayo de adherencia adaptado de la referencia (Díaz, 2004). El ensayo implementado en el laboratorio se basa en el equilibrio de fuerzas y de momentos que debe existir en el interior de una viga simplemente apoyada con dos cargas aplicadas en los tercios de su luz (figura 12). El dispositivo para ejecutar el ensayo se presenta en la figura 13a. Si la sección central de la viga está conformada por una rótula mecánica en la parte superior y una varilla en la zona inferior (figura 12b), el momento generado en el interior de la viga ( $P \cdot L/6$ ) lo debe soportar el par de fuerzas mostrado en la figura ( $T \cdot d = C \cdot d$ ), donde la rótula estaría sometida a compresión (fuerza  $C$ ) y la varilla, a tracción (fuerza  $T$ ). Si se tiene en cuenta que la rótula se diseñó para que nunca fallase a compresión, el modo de falla de la viga debe estar asociado a la fluencia o al deslizamiento de la varilla.

El concreto CAU 10% se vació, compactó y curó en los moldes de acero. Posteriormente, a los 28 días el montaje se probó en el laboratorio (figura 14a). En las tres pruebas realizadas sobre barras de acero de diámetros No. 2, No. 3 y No. 4, las varillas fluyeron y fallaron a tensión (figura 13b), y sin presentar deslizamiento. Con base en lo anterior queda claro que el concreto con adición de caucho de llanta en 10% de volumen de agregado grueso presenta una buena adherencia con el acero, por lo que es de esperarse que exista una compatibilidad de deformaciones que permita aplicar las fórmulas básicas de diseño en concreto.

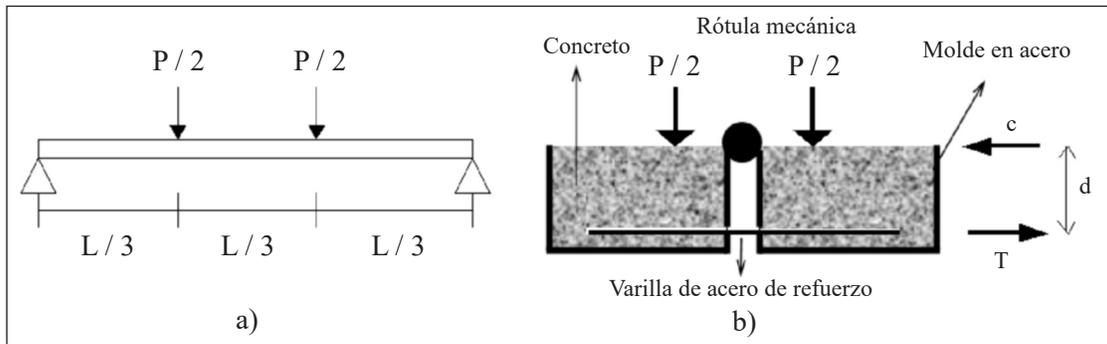


Figura 12 a) Viga simplemente apoyada con cargas en los tercios de su longitud. b) Dispositivo de ensayo y equilibrio de fuerzas internas en la zona central de la viga.

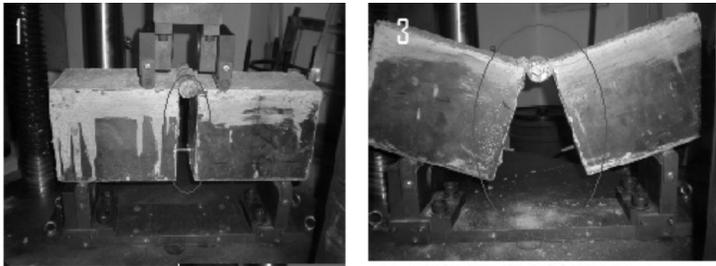


Figura 13 a) Montaje de la probeta. b) Falla de la varilla por tensión en el ensayo de adherencia.

APLICACIÓN: DISEÑO DE UNIDAD DE VIVIENDA BÁSICA DE DOS PISOS

Con base en las propiedades mecánicas estimadas en el laboratorio, y siguiendo los lineamientos del título C de la referencia (AIS, 1998) se diseñó el sistema estructural, en pórticos de concreto reforzado, de una unidad de vivienda de interés social de dos pisos (de la cual se tenían los planos arquitectónicos) usando dos mezclas de concreto diferentes: un concreto normal, correspondiente a la mezcla CAU 0%, y una mezcla de concreto adicionada con 10% de tiras de caucho (mezcla

Tabla 3

Propiedades de los materiales usados para el diseño

Propiedades	Unidad	CAU-00	CAU-10
Fy (esfuerzo de fluencia del acero)	MPa	420	420
f'c (esfuerzo resistente a la compresión del concreto a los 28 días)	MPa	26.7	21.7
E (módulo de elasticidad del concreto)	MPa	19400	15502
Peso específico	kg/m <sup>3</sup>	2400	

CAU 10%). Los principales parámetros para el diseño están indicados en la tabla 3 y el espectro de diseño de la edificación se muestra en la figura 14.

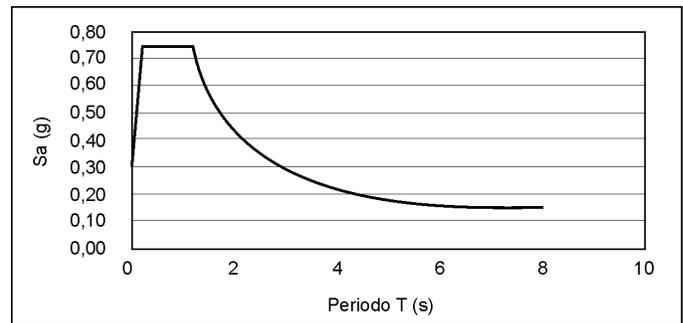


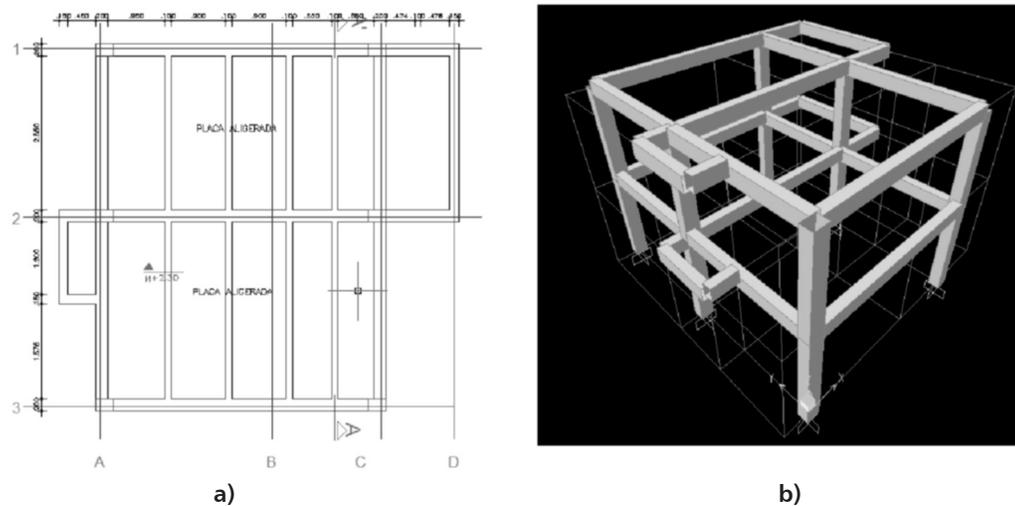
Figura 14. Espectro de diseño usado (coeficiente de amortiguamiento con respecto al crítico: 5%).

Las dimensiones de los elementos estructurales que garantizaron que la edificación cumpliera con los límites de deriva de entrepiso de la referencia (AIS, 1998) se indican en la tabla 4. Obsérvese que el efecto conjunto de menor peso y menor módulo de elasticidad del concreto adicionado tienen un efecto neto en el aumento de la sección transversal de las columnas para la edificación diseñada con la mezcla CAU 10%. El entrepiso usado se muestra en la figura 15a y el modelo numérico se muestra en la figura 15b.

Tabla 4

Dimensiones de los elementos estructurales para las viviendas analizadas

Elemento	CAU 0%		CAU 10%	
	Ancho (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)
Vigas	200	300	200	300
Columna	200	300	250	300



**Figura 15.** a) Esquema del entrespiso de la vivienda analizada. b) Modelo numérico por elementos finitos de la vivienda analizada.

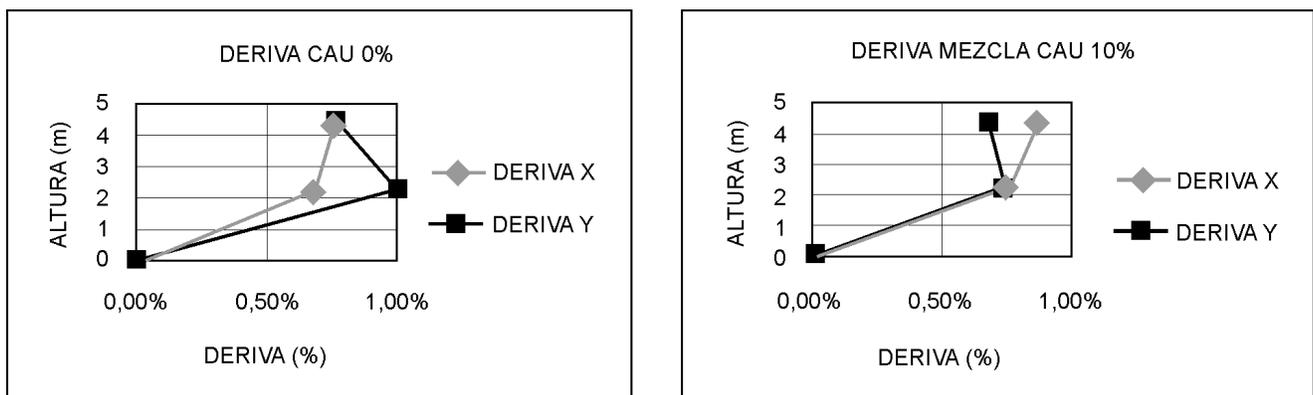
Los pesos por piso para realizar el análisis sísmico (incluyendo vigas, entrespiso y columnas) se indican en la tabla 5. Obsérvese que el peso de la edificación para ambas mezclas de concreto es similar.

**Tabla 5**  
Peso de las viviendas analizadas

	CAU 0% (ton)	CAU 10% (ton)
Cubierta	22,1	22,4
Piso 1	33,4	33,5
Total	55,5	55,9

Las derivas de las edificaciones con las dos mezclas de concreto analizadas se muestran en la figura 5. Obsérvese que en ambos casos son inferiores al 1% establecido en AIS (1998).

Para el diseño estructural se utilizaron las ecuaciones convencionales de concreto reforzado con las resistencias indicadas en la tabla 3. Así mismo, se usó un coeficiente de reducción de la fuerza sísmica ( $R$ ) de 5,0 y un amortiguamiento con respecto al crítico de 5% en ambos casos. El diseño se realizó para disipación moderada de energía (DMO), como se define en AIS (1998). No obstante, debe mencionarse que a la luz de los resultados experimentales es probable que tanto el  $R$  como el amortiguamiento puedan incrementarse para la mezcla adicionada con caucho, en cuyo caso las cantidades de acero de los elementos estructurales de la estructura con adiciones de caucho podrían disminuir, generando diseños más económicos. Este estudio se deja para trabajos futuros.



**Figura 16.** Deriva de la estructura analizada para la mezcla de concreto CAU 0% y para la mezcla CAU 10%.

Con base en las anteriores suposiciones de diseño, las cantidades de acero y concreto requeridas se resumen en la tabla 6.

**Tabla 6**  
Cantidades de acero y concreto para las viviendas analizadas

Cantidades	Acero kg-f	Concreto m <sup>3</sup>
CAU 0%	1.075	20,4
CAU 10%	1.100	21,6

De acuerdo con lo anterior, la vivienda diseñada con la mezcla CAU 10% requiere más acero y concreto que la diseñada con la mezcla CAU 0%. Esto trae como consecuencia que el presupuesto del capítulo de estructura de la vivienda diseñada con CAU 10% sea 9% superior al de la vivienda diseñada con la mezcla CAU 0%. Esto se debe principalmente al incremento en la cantidad de acero y sobre todo al aumento del precio unitario de la mezcla adicionada con caucho de llanta, puesto que requiere más cemento. Debido a lo anterior, actualmente se está trabajando en remplazar el cemento adicional requerido por la mezcla CAU 10% con otros elementos de desecho industrial con propiedades cementantes.

## CONCLUSIONES

- El asentamiento de las mezclas en estado fresco disminuye al incrementar la cantidad de caucho adicionado.
- Para mantener el asentamiento de las mezclas en estado húmedo y para minimizar la pérdida de resistencia a la compresión, la cantidad de cemento para 1 m<sup>3</sup> de mezcla fue de 367,92, 377,36, 396,23 y 415,09 kg para las mezclas de 0, 5, 10 y 15% de adición de caucho.
- Al incrementar el caucho en la mezcla, hubo una reducción en la resistencia a la compresión; a mayor adición de caucho, menor resistencia. Para la mezcla testigo se obtuvo un  $f'_c$  máximo (28 días) de 26,7 MPa, mientras que para las mezclas adicionadas en 5, 10 y 15% se generó una reducción de 12, 19 y 38%, en ese orden.
- El módulo de elasticidad de la mezcla con 10% de adición de caucho de llanta se redujo en un 20%

con respecto al de la mezcla base CAU 0%. Por su parte, la resistencia a la tensión y el módulo de rotura de la mezcla CAU 10% se redujeron en 11 y 6%, respectivamente.

- El ensayo de adherencia demostró que existe una adecuada compatibilidad de deformaciones entre el concreto adicionado con caucho (10% en volumen de agregado grueso) y el acero de refuerzo.
- El caucho de llanta en el concreto le proporciona ductilidad a la deformación en estado endurecido y la energía absorbida por el concreto con caucho es mayor que el de la mezcla testigo sin adición.
- El valor unitario de 1 m<sup>3</sup> de concreto se aumenta con la adición de caucho, ya que se requiere más pasta de cemento. Por esta razón, el capítulo de estructura del presupuesto analizado se incrementó en 9%.

## TRABAJOS FUTUROS

- Analizar el costo ambiental de la producción de este tipo de material.
- Tomando en cuenta que el caucho tiene una temperatura de combustión baja, se propone hacer estudios de resistencia al fuego de las mezclas de concreto adicionadas con caucho.
- Se propone estudiar las mezclas adicionadas con caucho y con otros desechos industriales con propiedades cementantes que replacen el cemento.
- Basado en los resultados de coeficiente de amortiguamiento respecto al crítico y la mayor capacidad de disipación de energía del concreto adicionado con caucho, se recomienda realizar estudios de pórticos a escala real sometidos a carga sísmica. De esta manera se podría estudiar si el factor de reducción de la fuerza sísmica  $R$  puede incrementarse, lo que conduciría a diseños más económicos.
- Se propone hacer ensayos de laboratorio para evaluar la durabilidad del concreto adicionado con desecho de caucho de llanta.

## REFERENCIAS

- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (1998). Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente.
- Cairns, R., Kew, H. Y. & Kenny, M.J. (2004). The use of recycled rubber tyres in concrete construction. Glasglow: University of Strathclyde. *The Onyx Environmental Trust Final Report*.

- Díaz, J., Bautista, L., Sánchez, A. & Ruiz, D. (2004). Caracterización de mezclas de concreto utilizadas en sistemas industrializados de construcción de edificaciones. *Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes*, No. 19, mayo.
- Domingo, J. & Salazar, D. (2004). Guía práctica para municipalidades sobre reúso de llantas. Programa Ambiental Regional para Latinoamérica. Patrocinado por CCAD, Usaid, ARD y Sica.
- Garrick, G. (2004). Analysis and testing of waste tire fiber modified concrete. Thesis Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering.
- Guoqiang, Li, Stubblefield, M., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C. & Huang, B. (2004). Development of waste tire modified concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 12, December.
- Hernández, F., Barluenga, G., Bollati, M. & Witoszek, B. (2002). Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 10, October.
- LEED-NC (2006). Sistema de clasificación de edificios sostenibles para nueva construcción y grandes remodelaciones. S.I.: Spain green building council.
- Proarca/Sigma, Usaid, CCAD (2004). Estudio para la evaluación mercadológica de los desechos industriales en El Salvador. El Salvador: Universidad Don Bosco, Departamento del Medio Ambiente.
- Quezada, D. (2001). Utilización de neumáticos desechados como combustible alternativo en fábricas de cemento. Memoria para optar al título de ingeniero civil industrial. Chile: Universidad de Talca.
- Segre, N. & Joeke, I. (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 9, September.
- Silva, P. (2006). Aprovechamiento industrial da borracha reciclada de pneus usados. Tese submetida a aprovação da Escola de Engenharia da Universidade do Minho para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental.
- Tantala, M.W., Lepore, J.A. & Zandi, I. (1996). Quasi-elastic behavior of rubber included concrete. Proceedings of the 12th International Conference on Solid Waste Technology and Management. Filadelfia.
- Topcu, I. & Avcular, N. (1997). Collision behaviors of rubberized concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 12, December.
- Topcu, I. (1995). The properties of rubberized concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 2, February.
- Toutanji, H. (1996). The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 18, No. 2, February.
- Zheng, L., Sharon, X. & Yuan, Y. (2008). Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 22, No. 5, May.



# Tercera faceta de la logística: la focalizada

DUSKO KALENATIC

dinvestigaciones@ucatolica.edu.co

Ingeniero de Organización de la Universidad de Belgrado, Yugoslavia. Economista de la Escuela Superior de Economía. Especialista en Ingeniería de Producción de la Universidad Distrital y en Periodismo del Instituto de Periodismo Yugoslavo. Doctor en Ciencias Técnicas de la Universidad de Santa Clara, en Cuba. Director del Grupo de Investigación en Producción (GIP) de la Universidad Católica de Colombia.

FEIZAR JAVIER RUEDA VELASCO

fjrueda@ucatolica.edu.co

Ingeniero industrial, profesor y miembro del Grupo de Investigación en Producción (GIP) de la Universidad Católica de Colombia.

CÉSAR AMÍLCAR LÓPEZ BELLO

cesarlopezb@udistrital.edu.co

LEONARDO JOSÉ GONZÁLEZ RODRÍGUEZ

dinvestigaciones@ucatolica.edu.co

Artículo recibido: 21/04/2008

Evaluación: 28/04/2008

Aprobado: 22/05/2008

## Resumen

Este artículo es el primero de una serie de escritos en los que se introduce la logística focalizada como tercera faceta de la logística, detrás de la logística militar y la logística empresarial.

En primer lugar, se realiza una introducción al marco contextual, el cual dio origen a la revolución en asuntos militares, y dentro de ella la necesidad del desarrollo de la logística focalizada.

Luego se detallan los conceptos funcionales y necesarios para su implementación en ambientes militares. Finalmente, se sacan algunas conclusiones, se analizan perspectivas de trabajo futuro y se estudian ciertos contextos donde los conceptos de logística focalizada pueden aplicarse fuera de ambientes de la defensa.

**Palabras claves:** logística militar, logística focalizada, logística de detección y respuesta.

## Abstract

This paper is showed as the first in a series of papers where focused logistics concepts are explained. Focused logistics is proposed as a trend in the developments of military logistics, business logistics and the current defence scene.

In first place, this paper presents a brief introduction around the contextual framework in military logistics and the revolution in military affairs which cause the generation of the focused logistics concepts. In second place, is explained the joint functional concepts and the emerging concepts. Finally some conclusions and future research are presented.

**Keywords:** military logistics, focused logistics, sense & response logistics.

## INTRODUCCIÓN

La logística, como área de conocimiento, tradicionalmente ha tenido dos facetas muy bien identificadas: la logística militar y la logística empresarial.

La primera faceta se ha definido como la ciencia cuyo objetivo es proporcionar a las fuerzas armadas los medios necesarios para la guerra (Posada, 2000) a través de ciclo logístico (determinación de necesidades, obtención de recursos, distribución y entrega, mantenimiento, logística inversa y reutilización) (Kalenatic et al., 2008). Según las escuelas de la investigación en logística propuestas por Sachan & Datta (2005) y Kent & Flint (1997), la logística militar pertenece a la categoría académica de ingeniería y modelación matemática, con una fuerte inclinación hacia la escuela positivista.

La segunda faceta es la logística empresarial, cuyos conceptos y definiciones han sido ampliamente difundidos y presentados entre otros por Council of Logistic Management (1985,1992), Jiménez & Hernández (2002) y Jiménez (2005). Siguiendo las escuelas y corrientes propuestas por Sachan & Datta (2005) y Kent & Flint (1997), la faceta empresarial tiene presencia tanto de la escuela positivista cuantitativa como de la cualitativa comportamental.

Las evidencias históricas de la evolución tanto de la logística empresarial como de la logística militar, descritas para el caso empresarial entre otros por Kent & Flint (1997), Farris (1997), y para el caso militar por Pagonis (1992), Paulus (2003), Huston (2004), McGrath (2007) y Kalenatic et al. (2008) han permitido identificar que cada una de estas facetas ha tenido mayor presencia y desarrollo en ciertos períodos del tiempo, estando la logística militar presente durante todos los estadios de la historia del hombre, mientras que la logística empresarial ha tenido un desarrollo independiente a partir de los principios del siglo XX, especialmente después de la década de los cincuenta, llegando en la actualidad a generar conocimiento de alto impacto en entornos diferentes del de la defensa.

A pesar de lo anterior, puede afirmarse que la logística empresarial y la militar no se han desarrollado de manera independiente, relacionándose y retroalimentándose principalmente alrededor del panorama de la defensa, donde en torno a las situaciones de conflicto se absorben desarrollos empresariales y se generan nuevos adelantos, que a su vez, con el paso del tiempo,

son transferidos a contextos empresariales. Por lo anterior, de acuerdo con las tendencias y el actual nivel de desarrollo, estas dos facetas pueden confluír y formar una tercera faceta.

La tercera faceta se enmarca en los actuales contextos de los escenarios de conflicto, y aunque es una extensión y ampliación de la logística militar, tiene como componente estratégico la adopción de los conceptos empresariales. Esta faceta corresponde en sí misma a la logística focalizada, cuyos conceptos se detallan en el apartado a continuación.

## LOGÍSTICA FOCALIZADA: MARCO CONTEXTUAL, CONCEPTOS FUNCIONALES Y EMERGENTES

La logística focalizada, mostrada como tendencia de logística militar, se enmarca dentro del horizonte de los escenarios de conflicto.

El panorama de la guerra en el nuevo siglo se ha modificado sustancialmente. Caracterizado por un Estados Unidos afianzado como la mayor potencia militar después de la guerra fría, aparentemente la menor amenaza presentada al final de los años ochenta y al principio de los años noventa originó presupuestos más austeros. Paralelamente se consolidaron la revolución de los temas militares y la reducción de las fuerzas de combate, que exigen mayor conectividad entre el teatro de operaciones y las fuentes de suministro, que deben asegurar el soporte físico e informativo de las unidades implicadas en las misiones.

Sin embargo, a principios del siglo XXI la nueva era se caracterizaba por las amenazas asimétricas, los rápidos cambios tecnológicos, así como por las significativas alteraciones políticas y económicas que cambian la percepción de identificar y hacer frente a las nuevas amenazas.

Asimetría se puede entender como “actuar, organizar y pensar diferente que el oponente, en orden de maximizar las ventajas propias, explotar las debilidades del oponente, lograr la iniciativa o ganar una mayor libertad de acción” (Metz, 2001). Tiene componentes de innovación y cambio de paradigmas, al igual que una fuerte dosis de incertidumbre. De acuerdo con lo anterior, se ha previsto que en el futuro inmediato predominarán los conflictos asimétricos, donde un adversario o conjunto de ellos puede atacar las debilidades de un adversario tecnológicamente superior, generando un gran daño

no sólo a nivel físico sino psicológico (Department of Defense, 2000).

Como respuesta a este contexto y como un ejercicio prospectivo para la continua transformación de las fuerzas, el Departamento de Defensa de Estados Unidos planteó el documento Joint Vision 2010 en el año 1995, actualizado y ampliado en el año 2000 con el nombre de Joint Vision 2020. El objetivo general de la transformación planteada por dicho documento es la dominación del espectro total de operaciones basado en seis conceptos operacionales, a saber (Department of Defense, 2000):

- *Maniobra dominante.* Habilidad de las fuerzas conjuntas para ganar una ventaja posicional con rapidez decisiva y en un tiempo operativo abrumador en el logro de las tareas militares asignadas.
- *Combate de precisión.* Habilidad de las fuerzas conjuntas para localizar, vigilar, distinguir y rastrear blancos u objetivos; seleccionar, organizar y usar los sistemas correctos; generar los efectos deseados; evaluar los resultados, y reentrar en combate con la velocidad y el ritmo operativo requeridos, a lo largo del espectro de operaciones.
- *Logística focalizada.* (Se detallará más adelante).
- *Protección de dimensión total.* Capacidad de la fuerza conjunta para proteger su personal y otros recursos requeridos para la ejecución contundente de las tareas asignadas. La protección de dimensión total se alcanza a través de la selección adecuada y la aplicación de medidas multicapas activas y pasivas, en los dominios del aire, tierra, mar, espacio, e información a lo largo de las operaciones militares con un nivel aceptable de riesgo.
- *Operaciones informacionales.* Acciones emprendidas para afectar la información y los sistemas de información, al tiempo que se defienden la información y los sistemas de información propia.
- *Comando y control conjunto.* Función de toma de decisiones en un ambiente complejo de aspectos multinacionales e interagencias. Comprende planeación, coordinación, dirección y control de las fuerzas y operaciones.

La logística focalizada es uno de los pilares de cambio planteados por Joint Vision 2020 y, como tal, es un elemento interdependiente de los demás conceptos.

De la misma manera, como se explica detenidamente a continuación, la logística focalizada brinda un soporte integrado y fundamental para el desarrollo de cualquiera de los demás conceptos.

El plan de campaña de logística focalizada en 2004 amplía el concepto de logística focalizada dado por Joint Vision 2020, definiéndola como la habilidad de proveer a las fuerzas armadas con el personal, equipamiento y provisiones apropiados, en el lugar, en el momento y en la cantidad adecuados en todo el espectro de las operaciones militares a través de un sistema de información en tiempo real y basado en redes, que provee una visibilidad total de los recursos, vinculando efectivamente al personal operativo y logístico en todos los servicios y agencias de apoyo, a través de innovaciones transformativas a las organizaciones y los procesos, es decir, con apoyo para todas las funciones (Department of Defense, 2004).

En el anterior concepto es especialmente innovador el uso intensivo de los sistemas de información en tiempo real como herramienta para la toma de decisiones en todos los niveles.

Como faceta logística (Department of Defense, 2008), evidencia, entre otras, las siguientes metas para la transformación en el soporte logístico de la fuerza, que desemboca en la generación de la logística focalizada en ambientes militares:

- *Sostener la fuerza.* Permitir que el sostenimiento de la fuerza sea más efectivo y eficiente, para lo cual se requiere mejorar de modo ostensible los procesos de despliegue y los sistemas de soporte de decisiones, acelerar la integración con empresas del sector privado, reducir los costos logísticos –lo que implica una adecuada valoración del riesgo industrial– y desarrollar planes de sostenimiento para los sistemas de armamento críticos.
- *Proyectar la fuerza en áreas distantes y con acceso denegado.* Mejorar la proyección de la fuerza y las capacidades de entrada forzada, permitir un largo alcance de las capacidades de ataque, mejorar las medidas de protección para transporte aéreo estratégico y asegurar el soporte a las fuerzas bajo ataques químicos y biológicos.
- *Modernizar el enfoque hacia la información de negocios.* Mantenerse a la par de las mejores tecnologías de la información y telecomunicaciones probadas y

disponibles, de tal manera que la información obtenida permita tomar decisiones oportunas en el nivel adecuado.

- *Comprimir la cadena de suministro.* Aplicar las mejores prácticas en cadenas de suministro disponibles, lo cual puede incluir generar alianzas con la industria en general, desarrollar la logística basada en el desempeño con los indicadores apropiados, de modo que se eliminen los pasos que no generan valor agregado.
- *Reducir los tiempos de ciclo.* Reducir los tiempos de ciclo a estándares logrados por la empresa privada, manteniendo dichos estándares para los proveedores de todo tipo de suministro.

Una vez estipulados estos propósitos (Department of Defense, 2004), despliega el alcance de estos objetivos a través de tres conceptos funcionales como idea central de logística focalizada, a saber:

#### Capacidad

La red logística debe tener la facultad del despliegue simultáneo y su sostenibilidad fundamentado en:

- Una sólida base industrial, determinada mediante una valoración del riesgo.
- Mantenimiento de una cantidad correcta en inventario y las mejores prácticas empresariales.
- Desplazamiento de fuerzas, equipamiento, sostenimiento y soporte (incluido el preposicionamiento) a través de los canales de distribución los cuales incluyen un despliegue robusto de principio a fin, una infraestructura de distribución igualmente robusta, así como líneas de comunicación seguras.

Los requerimientos de capacidad en la red logística están influenciados por la naturaleza de las operaciones que se realicen o afecten la red, así como por el éxito de los esfuerzos para reducir la demanda, objetivo que puede lograrse a través del mejoramiento de procesos, sistemas o estructuras organizacionales.

Ejemplos de mejoramiento de procesos incluyen la integración y uso efectivo de servicios, agencias de defensa, agentes comerciales, interagencias y capacidades logísticas multinacionales.

Mejoramientos potenciales para los sistemas futuros incluyen el diseño en despliegue, confiabilidad, interoperabilidad y habilidades de mantenimiento y soporte, por ejemplo, mejora en los sistemas de armamento o mejoras tecnológicas en eficiencia de combustible.

La mejora potencial en las estructuras organizacionales permitirá hacer uso efectivo de las bases en el teatro de operaciones, bases avanzadas y bases de operaciones divididas. El resultado será la reducción en las funciones de soporte que se deben desempeñar y el número de personas a las que se debe soportar en las operaciones conjuntas o combinadas en el área.

#### Control

Habilidad para el seguimiento, cambio o potencial reconfiguración de fuerzas, equipos, sostenimiento y soporte, incluso mientras están enrutados. Igualmente, llevar paquetes personalizados y sostenimiento directo al combatiente. Lo anterior como resultado de la combinación entre una visibilidad total de los recursos y las capacidades colaborativas en conjunto con herramientas de soporte a las decisiones, así como medidas de efectividad empresarial claramente definidas.

La visibilidad total se requiere sobre:

- Personas y cosas en movimiento a través de la red logística.
- La movilidad de las fuerzas militares y sobre el incremento de los entes comerciales que mueven personas y cosas a través de la red logística.
- Los nodos y vínculos de la red.

Por otra parte, las capacidades de colaboración, en conjunción con los sistemas de soporte a las decisiones, permitirán a los entes de toma de decisiones sincronizar, priorizar, dirigir, redirigir, integrar y coordinar usuarios, servicios logísticos y funciones de soporte.

La visibilidad necesaria y las capacidades de colaboración se facilitarán gracias a información en tiempo real, basada en redes y sistemas de información interconectados que provean una exacta visibilidad de los recursos, como parte de una imagen operacional integrada y de los vínculos efectivos entre la logística y los operadores en todos los entes involucrados.

De igual manera, es necesario definir claramente las medidas de efectividad de los niveles empresariales involucrados, lo cual permitirá tener el adecuado soporte, en el tiempo correcto. A su vez, estas métricas también permitirán mostrar la gestión de las decisiones y cómo éstas han impactado el sistema, al igual que indicar las oportunidades de mejoramiento que puedan existir.

#### Aseguramiento

Asegurar que las fuerzas, equipos, suministros y soporte lleguen a tiempo (dentro de los estándares de tiempo definido y en la cantidad y lugar donde se necesitan) para generar confiabilidad en los canales de distribución, en todos los niveles.

Los efectos combinados de capacidad, control y aseguramiento, unidos con la confianza del combatiente en los canales de distribución, pueden reducir los requerimientos de inventario y definir el tamaño apropiado de suministro, así como aumentar la efectividad del proceso logístico.

De los conceptos anteriores se derivan los siguientes conceptos emergentes, los cuales tienen como propósito soportar y amplificar la logística focalizada (Department of Defense, 2004).

#### Proyección de la fuerza conjunta y sostenimiento en todo el espectro de operaciones

La actual proyección de la fuerza y el sostenimiento de las operaciones se caracterizan por ser demasiado lineales, centralizados y por lo general ejecutados secuencialmente. Existe mayor atención en distribuir bienes en vez de capacidades, y la cola logística es frecuentemente muy larga, duradera y lenta. En el futuro, el sostenimiento y la proyección de la fuerza se caracterizarán por ser más simultáneos, descentralizados y distribuidos.

La idea central de este concepto es expandir y hacer plenamente adaptables las opciones militares mediante:

- La combinación de la proyección de la fuerza y el sostenimiento de las operaciones, en un solo sistema coherente.

- La anticipación de la respuesta por medio de capacidades interconectadas (a través de la detección y la interpretación del ambiente)
- El enfoque sobre la precisión desde el punto de efecto hacia la fuente de soporte y operando en un contexto global.

#### Logística de detección y respuesta (sense and response logistics)

*Logística de detección y respuesta* se entiende como la aplicación de los conceptos de “empresas de detección y respuesta” desarrollados por Haeckel (1999), donde se describe un marco de gestión para las empresas que enfrentan rápidos y continuos cambios, así como una constante dificultad para predecirlos. Su implementación creciente en ambientes militares y de negocios ha sido sugerida entre otros por Menotti (2004) y Lin et al. (2002).

En ambientes de defensa, la *Logística de detección y respuesta* se describe como un concepto transformacional, centrado en redes y dirigido por el conocimiento, el cual permite operaciones basadas en efectos. Este concepto debe proveer soporte preciso, adaptable y ágil.

A su vez, este concepto depende de procesos altamente adaptables, autosincronizados, al igual que dinámicos tanto física como funcionalmente, que empleen y mejoren el soporte cognitivo a las decisiones operacionales.

Este concepto debe permitir predecir, anticipar y coordinar acciones que provean ventaja competitiva en todos los niveles. De acuerdo con él, cualquier entidad militar, gubernamental o comercial es un potencial consumidor y proveedor de servicios logísticos. Esto entrega flexibilidad, robustez y escalabilidad para escenarios de conflicto expedicionarios a través de una demanda y soporte logístico adaptativo, receptivo y en tiempo real.

La logística de detección y respuesta ofrece a la logística focalizada una combinación entre la filosofía de producción *just enough*, presentada como respuesta a las desventajas de las filosofías *just in case* (logística basada en el aprovisionamiento) y *just in time*.

Esta combinación pretende evitar el riesgo de que un fallo relativamente pequeño (o unos fallos) en un eslabón (o varios) que paralicen el flujo de las necesidades en toda su extensión de la cadena de suministro

en el momento crítico, lo cual transforma a *just in time* en *just to late* (Farrel, 2004).

Por otra parte, y como electo coordinado con los conceptos funcionales y emergentes, Department of Defense (2001) definió la estrategia de defensa en la nueva era, que debe tener como uno de sus pilares un enfoque basado en capacidades, el cual no está centrado en los escenarios tradicionales, donde se buscaba determinar que un adversario puede llegar a combatir tan sólo en escenarios de alta incertidumbre, donde el objetivo es identificar y anticipar quién puede ser el adversario y dónde puede ocurrir la guerra.

Este enfoque, fundado en las capacidades de la defensa, debe reflejarse dentro de los conceptos de logística focalizada, y al ser un pilar estratégico debe ser coherente con las características de la logística estratégica planteadas por Kress (2002).

- La logística estratégica es definida en tiempo de paz.
- Las decisiones logísticas son estables.
- El plan estratégico-logístico es robusto y con efectos a largo plazo.

Esto se refleja en:

- Inversión en investigación y desarrollo (ciencia y tecnología).
- Decisiones relacionadas con la infraestructura.
- Políticas de obtención y reaprovisionamiento a largo plazo.

Como esfuerzo estratégico, Department of Defense (2004) aprueba siete capacidades sobre las cuales debe enmarcarse la logística focalizada, a saber: rápido despliegue y distribución conjunta; sostenimiento ágil; ingeniería operacional; logística multinacional; protección de la salud de la fuerza, y gestión conjunta del teatro logístico. Estas capacidades, así como los esfuerzos de transformación necesarios para su implementación, se describirán en publicaciones posteriores.

Con base en el marco contextual y los conceptos de logística focalizada, puede hacerse evidente la confluencia entre las facetas militar y empresarial dentro de ambientes de alta complejidad como los actuales escenarios de defensa, en donde interactúan múltiples partes interesadas, tanto militares como civiles, así como empresas públicas y privadas en contextos de

operaciones nacionales e internacionales, en donde pueden intervenir una o varias naciones. Por lo anterior, se hace pertinente el estudio de los conceptos de logística focalizada, pues el marco particular donde se desarrolla puede extrapolarse hacia enfoques sometidos a condiciones particulares de incertidumbre, tanto a nivel empresarial como de operaciones humanitarias o macroproyectos.

En esa línea conceptual se abre un campo de estudio en la generación de aplicaciones bidireccionales, que permitan incrementar la práctica de logística focalizada como faceta logística, a partir de su interacción e integración con los desarrollos militares, empresariales y, de manera análoga, contribuir al desarrollo incremental de la logística empresarial mediante la integración de los conceptos, prácticas y metodologías propias de la logística focalizada.

## CONCLUSIONES

- El concepto de logística focalizada surge como respuesta al actual contexto de los escenarios de conflicto, los cuales se encuentran sujetos a altas dosis de incertidumbre, lo cual conduce a que se pueda brindar un soporte logístico basado en un sistema de información en tiempo real y fundamentado en redes. Dicho sistema de información debe incluir herramientas que permitan asesorar el proceso de toma de decisiones tanto a nivel estratégico, operacional o táctico (Kalenatic, 2008).
- La logística estratégica en ambientes de defensa y como parte de los conceptos de logística focalizada se ha caracterizado por inversiones en investigación y desarrollo, así como por los esfuerzos nacionales a largo plazo en planeación y desarrollo de la infraestructura del soporte y sostenimiento, tales como puertos, aeropuertos e infraestructura vial; sin embargo, se abre un campo para investigación en donde deben planearse los escenarios para fomentar la integración de las organizaciones públicas y privadas participantes de esfuerzos logístico-empresariales, de tal manera que éstos contribuyan a la planeación de esfuerzos logísticos estratégicos a largo plazo dentro de los entornos locales, regionales o nacionales donde se desempeñan.
- Por lo anterior, aunque aparentemente la logística focalizada prevé su aplicación en ambientes asi-

métricos el anterior aspecto puede entenderse como decisiva igualmente en los ambientes simétricos.

- Aunque en la literatura oficial de logística focalizada se destacan como ámbito de aplicación de sus conceptos y capacidades las operaciones conjuntas, debido al enfoque estratégico basado en capacidades, el cual pretende generar una alta autonomía de las fuerzas, es previsible que el concepto de logística focalizada se pueda aplicar en ambientes que superen el concepto de operaciones conjuntas, tales como las operaciones combinadas y multiagenciales.
- Se han identificado como elemento importante para el éxito de la logística focalizada los desarrollos investigativos en torno a la escuela comportamental, de acuerdo con las tendencias evidenciadas por Sachan & Datta (2005) y David J. Bowersox & Theodore (2000) y particularmente dentro de esta escuela se convierte en crítico el análisis e innovación sobre los conceptos de logística colaborativa.
- Para la exitosa aplicación de los conceptos de logística focalizada en contextos de alta volatilidad de condiciones cambiantes en el tiempo y con múltiples partes involucradas, se hace necesario contar con un sistema de soporte a las decisiones que comprendan, entre otros, herramientas de modelamiento matemático con enfoques dinámicos y multicriterio. Avances iniciales en este tipo de herramientas los ha mostrado Kalenatic et al. (2008).

## REFERENCIAS

- Bowersox, Donald J.; Closs, David J. & Stank, Theodore P. (2000). Ten Megatrends that Will Revolutionize Supply Chain Logistics. *Journal of Business Logistics*, vol. 21, No. 2.
- Council of Logistic Management (1985). Oak Brook, IL.
- Council of Logistic Management (1992). *What it's about*. Oak Brook, IL.
- Department of Defense (2000). *Joint Vision 2020*, publicado en <http://www.dtic.mil/jointvision/jvpub2.htm>. Fecha de consulta 10 de septiembre de 2007.
- Department of Defense (2004). *Focused Logistics Campaign Plan*. Washington DC: US Government Printing Office.
- Department of Defense (2001). QDR quadrenial defense report review. DOD, recuperado el 13 de agosto de 2008, publicado el 30 de septiembre de 2001. Disponible en <http://www.defense-link.mil/pubs/pdfs/qdr2001.pdf>.
- Farrel, L. Jr. (2004). *Battlefield logistics: color it purple*. Nacional Defense.
- Farris, M. (1997). Evolution of academic concerns with transportation and logistic. *Transportation Journal*, 37, 1.
- Haeckel, Steve H. (1999). *Adaptive Enterprise - Creating and Leading Sense-and-Respond Organizations*. Harvard Business School Press.
- Hess, Earl J., (2006). Retreat from Gettysburg: Lee, Logistics, and the Pennsylvania Campaign. *The Journal of American History*, 92, 4.
- Huston, J. (2004). *The sinews of war: Army Logistics 1775-1953*. Honolulu, Hawaii: University Press of the Pacific.
- Jiménez, J.E. & Hernández, S. (2002). *Marco conceptual de la cadena de suministro: un nuevo enfoque logístico*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.
- Jiménez J.E., (2005). *Estado del arte de los modelos matemáticos para la coordinación de inventarios en la cadena de suministro*. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.
- Kalenatic, D., López, C., González, L. & Rueda, F. et al. (2008). *Ciencia, tecnología e innovación*, tomo I, cap. 1. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Kalenatic, D., López, C., González, L. & Rueda, F. (2008). Localización de una plataforma de *cross docking* en el contexto de logística focalizada utilizando distancias euclidianas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 18, 001, 17-34.
- Kent, J. & Flint, D. (1997). Perspectives on the evolution of logistics thought. *Journal of business logistics*, vol. 18.
- Kress, M. (2002). *Operational Logistics*. Kluwer Academic Publishers Group.
- Lin, G. et al. (2004). *The Sense-and-Respond Enterprise IBM researchers develop integrated SAR system of global value chain optimization*. Operations Research Management Science Today\_\* | En línea.WMF \*J010009000003210000000000050000000000004000000003010800050000000b0200000000050000000c020200200030000001e-00040000002701ffff030000000000http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-4-02/frvaluechain.html - Publicado abril 2002, consultado el 6 de mayo de 2008.
- McGrath, John J. (2007). *The Other End of the Spear: The Tooth to-Tail Ratio (T3R) in Modern Military Operations*. The Long War Series Occasional Paper 23, Combat Studies Institute Press.
- Menotti, M. (2004). *The Sense-and-Respond Enterprise*. Operations Research Management Science Today <http://www.lionhrtpub.com/orms/orms-8-04/enterprise.html> - Publicado en agosto de 2004, consultado el 6 de mayo de 2008.
- Metz, S. (2001). *Asimetría y estrategia militar de USA*. Instituto de Estudios Estratégicos, U.S. Army War College.
- Pagonis, W. (1992). *Moving Mountains: Lessons in leadership and logistics from the gulf war*. Harvard Business School Press.
- Paulus, R. (2003). *Logistics in the forgotten war*, Army Logistician, 35, 6; ProQuest Military.
- Posada, E. (2000). La logística militar y sus aplicaciones en la logística empresarial. *Revista Pensamiento y Gestión*, No. 6, Universidad del Norte.
- Sachan, D. & Datta, S. (2005). Review of supply chain management and logistics research. *International Journal of Physical Distribution and Logistics*, 35, 9/10.



# Modelo de un sistema de gestión de residuos sólidos para organizaciones

LUZ ANGÉLICA RODRÍGUEZ BELLO

angelica.rodriguez@escuelaing.edu.co.

Ingeniera industrial, M.Sc. en gestión y políticas ambientales del IIIEE de la Universidad de Lund (Suecia). Especialista en informática industrial y en aseguramiento de la calidad. Docente en pregrado y posgrado y directora del Centro de Estudios en Sistemas de Gestión de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Experta en implementación de sistemas de gestión de calidad y gestión ambiental, con énfasis en desarrollo sostenible.

Artículo recibido: 18/04/2008

Evaluación: 24/04/2008

Aprobado: 29/05/2008

## Resumen

Los residuos sólidos representan una oportunidad para establecer cadenas productivas, ya que pueden generar ingresos, disminuir los costos de disposición, crear nuevos empleos y reducir los impactos ambientales asociados a éstos. Es decir, se establecen beneficios económicos, ambientales y sociales, ofreciendo una perspectiva sostenible. Los factores que permiten implementar dicho modelo se determinaron usando la metodología de prospectiva, la cual mostró los escenarios más viables mediante la participación de los involucrados y expertos en el tema. Los factores que se analizaron fueron la caracterización de los residuos, la cultura, los generadores, las políticas, los recipientes de recolección, los recursos tecnológicos y financieros, la cadena productiva, los mecanismos de divulgación y los beneficios percibidos. A partir de su análisis se determinaron los factores predominantes, los de resultado, los de conflicto y los de problemas autónomos. A los factores predominantes se les desarrollaron estrategias de implementación con el propósito de establecer el modelo de gestión de residuos que se puede usar con resultados altamente satisfactorios en diferentes contextos. De esta manera, el logro del escenario futuro se consigue con acciones en el presente.

**Palabras claves:** residuos sólidos, cadenas productivas, desarrollo sostenible.

## Abstract

Solid wastes represent an opportunity to establish a productive chain. These can generate revenues, reduce disposal cost, create new employments and reduce environmental impacts. In fact, economical, environmental and social benefits are established through the sustainable development perspective. Factors allowing the implementation of this model were determined using prospective methodology. This methodology shows the most viable scenario, through the participation of different interested parties and experts in the field. The factors analyzed were: wastes characterization, culture, wastes generators, policies, trash cans, technical resources, financial resources, productive chain, communication mechanisms, and benefits. The predominant factors, as well as, the resulting factors, the conflict factors and autonomous problems factors were determined by analysis. Implementation strategies were developed for the predominant factors in order to establish a wastes management model, which can be used with satisfactory result in different contexts. In this way, the future scenario is achieved by present actions.

## INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de residuos sólidos, muchos piensan en problemas ambientales, como el calentamiento global (por el metano que éstos producen); para otros significa agotamiento de recursos renovables y no renovables; otros los asocian a los problemas que generan a la salud y algunos más ven oportunidades de aprovechamiento de recursos, de generación de dinero y oportunidad de negocio y empleo. En lo que sí puede haber acuerdo es en que se quieren evitar los problemas que éstos generan y sacar el mayor beneficio a las oportunidades que crean. En la generación cada vez mayor de residuos están involucrados numerosos actores, como los consumidores, quienes cada vez compran más bienes para satisfacer sus necesidades; los productores de bienes y servicios, quienes cada vez ofrecen más variedad de productos para satisfacer las mismas o nuevas necesidades, con el agravante de que dichos productos tienen una menor vida útil debido a los cambios tecnológicos; las empresas de recolección, que no hacen segregación de materiales, aunque muchas veces el problema radica en que no hay segregación en la fuente; las autoridades ambientales, que han creado políticas y leyes que impulsan su reciclaje y aprovechamiento, pero que no han desarrollado mecanismos adecuados para su implementación, problema que no es exclusivo de Colombia (Bahri, 2005).

Las organizaciones producen grandes cantidades de residuos en el desarrollo de su actividad; éstas deben disponerlos a través de empresas de aseo, que les cobran dicho servicio de acuerdo con el aforo o volumen producido. A nivel domiciliario, los grandes conjuntos residenciales que se han organizado y pagan por el volumen producido; muchos han establecido contrato con recicladores, quienes selecciona los residuos recuperables de los cuartos de basura antes que pase el servicio de aseo (Rodríguez, 2007).

Actualmente, el manejo de residuos sólidos se hace a través de un ciclo lineal o abierto; las empresas se abastecen de materiales para producir los bienes o servicios demandados por los clientes y luego se envían a rellenos sanitarios cuando termina su vida útil. Estos residuos se degradan a lo largo de un proceso que puede durar más de cien años. De esta manera, lo que en un comienzo fueron recursos se convierten en generadores de contaminación, en medios de propagación de plagas y enfermedades. El propósito

es generar un ciclo cerrado donde los productos, después de su uso, se puedan utilizar nuevamente como recurso o materia prima de otros procesos productivos (Rodríguez, 2007).

## Problemática

Los rellenos sanitarios, aunque se manejen en forma adecuada y se controlen sus impactos ambientales, cada vez requieren más espacio para recibir los residuos sólidos domiciliarios e industriales. Colombia produce 25.079 ton/día, de las cuales 23.284 son arrojadas en 255 rellenos sanitarios y en 59 plantas de tratamiento de residuos sólidos, y 1.796 ton/día se disponen inadecuadamente (Superintendencia de Servicios Públicos, 2008). Por ejemplo, Doña Juana, que tiene una extensión de 482 hectáreas y vida útil hasta el 2012, recibe residuos de ocho millones de bogotanos y de los habitantes de 40 municipios cercanos, recibe en total 6.300 ton/día y 600 ton/día, respectivamente. Es decir, se reciben 787 g/día por cada habitante de la capital, cantidad que no es alta si se compara con la de un sueco, que en promedio genera 1.452 g/día (Swedish Environmental Protection Agency, 2008).

Aunque hay iniciativas para la creación de centros o plantas de reciclaje, la comunidad no los quiere cerca de sus residencias y los ingresos por recuperación de materiales sólo cubren el 9% de los costos operacionales, únicamente se aprovecha el 13% de los residuos que ingresan y el 87% va a disposición final (Superintendencia de Servicios Públicos, 2008), lo cual hace que se duplique el transporte hasta la planta de reciclaje y luego al relleno sanitario. Por esto se observa que es necesario hacer cambios en el sistema actual para que funcione de manera sostenible, generando ingresos, reduciendo los impactos ambientales y de salud. Recientemente se presentó en el Senado un proyecto de ley, “basura cero” (Parody, 2007), que ofrece algunas mejoras, pero aun no es un sistema funcional, porque en los países donde se ha implementado (México y Argentina) los resultados no alcanzan al 10% de recuperación.

Para muchas organizaciones, el costo de disposición de las basuras puede ser uno de los servicios más altos. Las tarifas de recolección promedio para el primer semestre de 2008, para usuarios no residenciales grandes generadores en la zona norte, fueron de \$114.537 por m<sup>3</sup> (Unidad de Servicios Públicos, 2008). Si parte

de estos residuos se reciclaran, se podría disminuir en forma proporcional la cantidad que se paga por recolección y los impactos que generan al disponerlos inadecuadamente.

En este artículo se describe cómo se crea el modelo para lograr la segregación de residuos en la fuente, para su posterior venta a cadenas de reciclaje, disminuyendo considerablemente los residuos que se arrojan a relleno sanitario. Dicho modelo es autofinanciable, ya que todo gasto que se hace en infraestructura es realmente una inversión que se recupera en un período inferior a dos años, dependiendo de las condiciones de cada organización.

### Objetivo

Establecer un modelo de sistema de gestión de residuos sólidos dentro de una organización para su aprovechamiento en cadenas productivas. Se establece un programa piloto que se puede reproducir, identificando cadenas de valor para el aprovechamiento de los residuos sólidos, las cuales generan el máximo valor a todos los actores de la cadena y la disminución de costos para la organización, donde se crea empleo y se cambia la perspectiva con la que se conciben los residuos, se reducen los impactos ambientales y se identifican los aspectos culturales y socioeconómicos que permiten el cambio de actuación frente a la separación en la fuente de los residuos sólidos por parte de cada uno de los generadores o miembros de la organización.

### METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología utilizada es la prospectiva donde se hacen la concepción de escenarios futuros y la determinación de las acciones que se deben realizar en el presente para alcanzar el futuro planeado (Godet, 1993, 2004). Se busca la participación de expertos y de las partes involucradas para la construcción de los escenarios posibles. Esta metodología tiene diferentes pasos o etapas que se definen a continuación:

- *Diagnóstico.* Determinación de la situación actual donde se establecen los recursos humanos, de capital y la tecnología disponible, la segregación y caracterización de los residuos generados en la comunidad,

y la legislación vigente para el cuidado del medio ambiente.

- *Análisis estructural.* Determinación de las variables claves (factores), su interrelación con base en su clasificación en directas e indirectas.
- *Determinación de estrategias.* Planteamiento de las estrategias de cada uno de los actores, identificando los retos estratégicos y los objetivos asociados.
- *Análisis morfológico.* Análisis de las estrategias posibles, identificando los aspectos más favorables, de acuerdo con la estructura actual y la estructura propuesta. La propuesta debe ser pertinente, tener coherencia, ser verosímil y tener transparencia en su análisis.
- *Reducir la incertidumbre.* Aplicación de diferentes métodos para reducir la incertidumbre y cuantificar la probabilidad de éxito de las hipótesis planteadas.
- *Articular prospectiva y estrategia.* Determinación de escenarios futuros y de las estrategias para alcanzarlos.
- *Desarrollo del plan de trabajo.* Identificación y evaluación de opciones estratégicas para poner en práctica, buscando la obtención de los resultados
- *Obtención de resultados.* Modelo para la implementación del sistema de gestión de residuos como programa piloto para multiplicar en otras comunidades.

### MODELO DE GESTIÓN DE RESIDUOS

El modelo se construye siguiendo los pasos de la metodología. A continuación se enuncian los componentes que se desarrollaron:

#### Diagnóstico

En el diagnóstico se determina la cantidad de residuos, tanto en peso como en volumen, de cada uno de los tipos de residuo en las áreas geográficas de la organización o comunidad. El peso es clave para fijar el precio de venta, en tanto que el volumen es necesario para determinar los recipientes de recolección y la reducción en el pago de tarifas de aseo, cuyo aforo está basado en el volumen. Los tipos de residuo son papel-cartón, plástico, metales (latas), vidrio, orgánicos y basura (los que definitivamente no se lograron clasificar o estaban demasiado mezclados). De esta manera se puede establecer la cantidad de cada uno

de los materiales, las zonas de mayor generación de cada uno de los materiales y, en general, la cantidad de residuos aprovechables.

### Análisis estructural

La determinación de los factores claves exige la participación de actores y expertos en tres talleres consecutivos, donde se busca no sólo identificar todos los factores claves, sino cuáles son más relevantes.

### Actores y expertos

Los factores que influyen directamente en el manejo de los residuos sólidos se establecen por talleres de expertos (actores con conocimientos en el manejo de los residuos sólidos) e involucrados, es decir, quien tiene contacto o incidencia en el proceso.

En la figura 1 se muestran los actores que intervienen, usando la analogía del concepto de proceso. Como entrada están todos los generadores; como salida, todas las cadenas productivas resultantes por cada uno de los materiales (plásticos, papel- cartón, metales, vidrio, orgánicos, basuras), que en muchas ocasiones son recuperadores o empresas intermediarias; como actores internos, todas las dependencias que generan políticas de reciclaje y aprovechamiento, que financian dichas opciones, quienes propician y hacen la segregación y recolección de los residuos, y quienes informan y educan para llevar a cabo dicho proceso.

Los expertos son todas aquellas personas idóneas en el tema del manejo de los residuos sólidos que, por sus conocimientos y experiencia, pueden ser especialistas en el manejo de los residuos sólidos, como funcionarios de organismos gubernamentales, contratistas de reciclaje u operadores de aseo. Es importante encontrar actores y expertos externos e internos que puedan dar una visión holística a la problemática, y que su análisis y solución responda a los requerimientos legales y normativos tanto actuales como futuros.

### Definición y consolidación de factores

Los factores se definen a través de un proceso participativo, donde se contemplan escenarios presentes para el aprovechamiento más eficaz y eficiente de los residuos. En el primer taller, cada uno de los actores define los factores que considera importantes para la creación del modelo, dado su conocimiento en el tema, y da una breve descripción de éste para luego discutir como grupo cuáles realmente son determinantes, qué elementos identifican cada factor, cuáles se asemejan y se pueden agrupar en una misma categoría. Un grupo más pequeño, integrado por quienes lideran el proyecto, hace una última validación y selecciona los factores con los cuales se seguirá trabajando.

Los factores que se determinaron como relevantes fueron las políticas para reciclaje, los residuos y su caracterización, los recipientes de recolección, los generadores, la cadena productiva o posibles usuarios

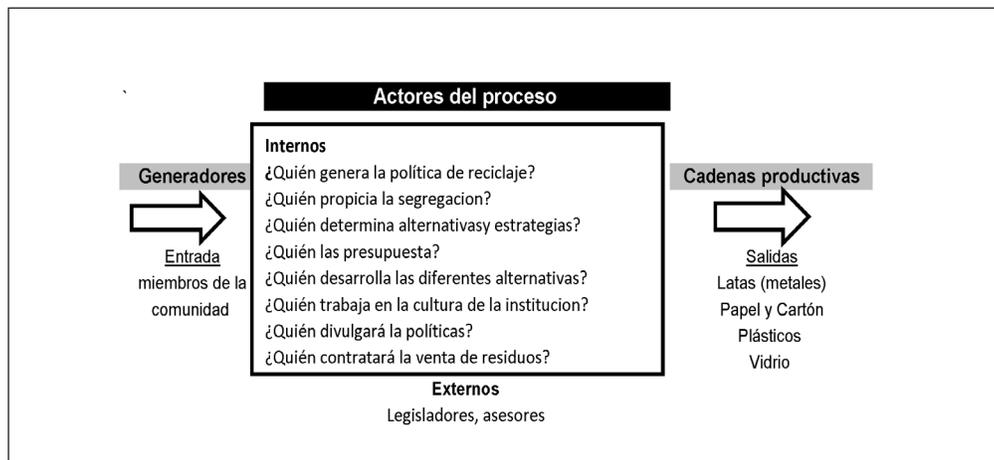


Figura 1. Actores del proceso.

**Tabla 1**  
Formato de consolidación de factores usado durante el taller 1

No.	Factores unificados	Descripción	Ítems consolidados
1	Políticas	Lineamientos institucionales para motivar, promover, planear, mantener, monitorear y mejorar el manejo adecuado de los recursos involucrados en el manejo de los residuos sólidos en toda la cadena productiva para su aprovechamiento.	2, 4, 6, 17, 19 25, 34, 35, 39, 40, 49
2	Residuos	Tipo y cantidad (volumen y pesos) de materiales que se generan en la institución.	11, 18, 30, 52
3	Generadores	Son todos los actores que generan los residuos.	3, 5, 8, 13, 26, 47

de los materiales, los recursos técnicos, los recursos financieros, los mecanismos de divulgación, la cultura (comportamiento de los involucrados) y los beneficios económicos, sociales y ambientales que esperan recibirse. En la tabla 1 se muestra un ejemplo de tres factores unificados, su descripción y las opiniones de los participantes en el taller de actores que se aunaron en la consolidación de éstos.

#### Interrelación de los factores

La interrelación de los factores permite estudiar su dependencia con el fin de establecer los de mayor impacto, es decir, cuáles son causa de otros, denominados “motores” o de alta motricidad, y por otro lado establecer los que muestran alta dependencia o son consecuencia, llamados “dependientes”. Para establecer dicha interrelación se realiza un segundo taller, donde se presenta a los actores y expertos la consolidación de los factores (resultados del taller anterior) y se dibuja una matriz de doble entrada, en la que tanto en las filas como en las columnas se presenten los factores consolidados de manera ordenada, siguiendo la misma secuencia, con el fin de encontrar entre todas las relaciones de dependencia y motricidad (es importante aclarar que el análisis de la diagonal de la matriz se debe omitir).

La existencia de relación entre factores se marca con un uno (1) y la no existencia con un cero (0), como se presenta en la tabla 2. Como ejemplo se puede observar el factor Políticas (primero en la primera fila), el cual tiene una relación directa con todos los otros factores que aparecen en las columnas. Al evaluar la relación entre las políticas y los residuos, se encuentra que si hay políticas de venta de productos retornables,

esto generará menos residuos, pero si se prohíbe el uso de vidrio, se incrementarían los residuos. Con respecto al factor humano, las políticas existentes en asignación de tareas, capacitación y comunicación afectarán al personal encargado en el manejo de los residuos y al personal que labora en la organización. En relación con los recipientes de colección, si hay políticas para la adquisición o disponibilidad de recipientes para separación de cada residuo, esto afectará en qué recipientes se decida comprar, en su capacidad, color... En lo que tiene que ver con los recursos tecnológicos, pues si la política es de separación implicará tener la infraestructura adecuada para el almacenamiento temporal de residuos segregados. En relación con los recursos financieros, las políticas de inversión determinarán las inversiones que habrá que hacer para llevar a cabo el modelo de gestión de los residuos. Con respecto a la cadena productiva, las políticas determinarán a quién se le entregan o venden los residuos, puesto que se puede negociar con recicladores o con empresas intermediarias dedicadas a la compra de éstos o en el mejor de los casos con empresas que usan dichos materiales como insumo, como es el caso de Peldar, que compra vidrio y tiene centros de acopio distribuidos en diferentes partes del país. En relación con la divulgación, las políticas afectarán los mecanismos de comunicación que se usen en el proceso de sensibilización y cambio cultural necesario para el reciclaje. En lo referente al factor económico, las políticas podrán afectar los resultados que se alcancen, ya que si logran una alta tasa de reciclaje se incrementarán los ingresos y se podrán procesar más materiales como materia prima de otros procesos, generando posibilidades de empleo para otros.

**Tabla 2**  
Matriz de relación de factores para desarrollar durante el taller No 2.

Item		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Motricidad
	Factor	Políticas	Residuos	Factor Humano	Recipientes de Disposición	Recursos Tecnológicos	Recursos Financiero	Cadena Productiva	Divulgación	Cultura	Factor Económico	
1	Políticas	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
2	Residuos	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	7
3	Factor Humano	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	5
4	Recipientes de Disposición	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	7
5	Recursos Tecnológicos	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	4
6	Recursos Financiero	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	5
7	Cadena Productiva	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	4
8	Divulgación	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	7
9	Cultura	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	6
10	Factor Económico	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	3
	<b>Dependencia</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>57</b>

Todas estas relaciones muestran cómo las políticas son la causa que genera efectos en los demás factores. Sin embargo, esta relación también puede ser de dos vías, pues si no se está logrando la cantidad de residuos proyectadas, las políticas se podrían cambiar para buscar alcanzar lo propuesto.

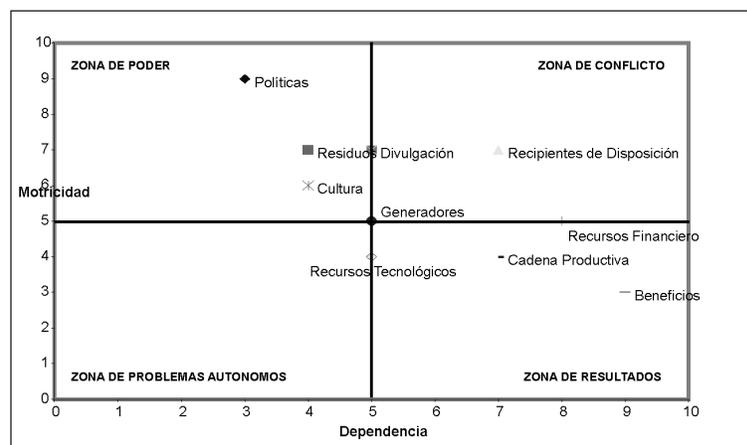
Así como se realizó el análisis con las políticas, se debe hacer lo mismo para los otros factores. Es vital que a la determinación de la relación se llegue por consenso a través de la argumentación clara, concreta y objetiva por parte de todos los actores y expertos.

Posteriormente, se suma la puntuación obtenida tanto para la Motricidad (filas) como para la Dependencia (columnas) y se continúa con la sumatoria global, con el fin de observar cuáles son los factores de mayor motricidad o aquellos que obtuvieron la mayor puntuación, y por otro lado los de mayor dependencia o cuáles son consecuencia de acciones en otros factores.

Como se puede ver en la matriz, es difícil determinar completamente el nivel de prioridad que se les debe dar a los factores, ya que aquellos que tienen un valor alto de dependencia pueden tener un bajo valor de motricidad, lo que hace necesario utilizar una herramienta que permita ver con claridad en qué factores hay que concentrar los esfuerzos.

Dicho análisis se realiza en un plano cartesiano dividido en cuatro zonas, donde el cuadrante de menor dependencia y menor motricidad se llama *zona de problemas autónomos o independencia*, lo cual quiere decir que los factores ubicados allí no son realmente importantes en el modelo, ya que no genera cambios ni muestra re-

sultados. El cuadrante de menor dependencia y mayor motricidad se denomina *zona de poder*, aquella donde hay que centrar mayores esfuerzos porque son los factores que generan los cambios del sistema. El cuadrante de mayor dependencia y menor motricidad se llama *zona de resultados*, que como su nombre lo indica mostrará los efectos del trabajo con los factores de la zona de poder. Y el cuadrante de mayor dependencia y mayor motricidad se denomina *zona de conflicto*, es decir, son factores que se tendrán que trabajar porque muestran relación de causa con otros, generalmente en asocio con los determinados en la zona de poder. Los factores que se van a trabajar serán los identificados en la zona de poder, lo cual permite priorizar los factores y determinar por dónde empezar el trabajo para el adecuado manejo de los residuos mediante la generación de una cadena productiva (figura 2).



**Figura 2.** Zonas de motricidad y dependencia.

En la zona de poder se encuentran los factores vitales para el manejo de los residuos, puesto que son primordiales para la creación del plan de gestión integral de los residuos sólidos. En el ejercicio de aplicación resultó que las políticas, los residuos y la cultura son los factores vitales.

**Análisis morfológico y determinación de estrategias**

Las estrategias se formulan para los factores de mayor motricidad, ya que son la causa de muchos otros y permitirán concentrar los esfuerzos y maximizar los resultados. Estas estrategias para el escenario presente se determinan en el tercer taller de actores y expertos.

- **Políticas.** Son las orientaciones o directrices generales que rigen la institución sobre el manejo integral de los residuos sólidos, y deben abarcar todos los pasos en la cadena de aprovechamiento de los residuos; así mismo, comprenden todas las actividades de planeación, ejecución, seguimiento y mejora para llevar a cabo el ciclo cerrado para el aprovechamiento de los residuos. Las políticas que hay que considerar son las de minimización de generación, reducción de consumo y reutilización de material, de aprovechamiento y venta de residuos, de logística para determinación de recipientes de recolección, separación y distribución, políticas de manejo para la recolección y acopio de los residuos, políticas de inversión para el programa, políticas de información y educación, las cuales deben incluir mecanismos de divulgación, señalización, políticas para los proveedores, políticas de seguimiento, medición y mejora para conocer el desempeño del modelo, entre otras.
- **Residuos.** Los residuos se deben caracterizar, cuantificando su volumen y peso, y además estableciendo los posibles usos como materiales de segunda para determinar las cadenas productivas. Actualmente hay grupos de recuperadores, mal llamados recicladores, que están agrupados en cooperativas o asociaciones y ofrecen recolección del material cuando éste es superior a media tonelada semanal. Otra alternativa es negociar con empresas formales de reciclaje y determinar la mejor opción en precio de compra y frecuencia de recolección. El beneficio adicional al negociar con una asociación o cooperativa es la oportunidad de reducir la renta líquida por inversio-

nes en control y mejoramiento del medio ambiente. Ésta se debería trabajar conjuntamente con los recipientes de reciclaje, y para su codificación de colores para cada material se puede usar la Guía Técnica Colombiana No. 24 para la separación de residuos en la fuente (Icontec, 2006), la cual asocia un color con cada tipo de residuo (tabla 3).

**Tabla 3**  
Guía de uso de colores para la separación de residuos en la fuente

RESIDUO SÓLIDO	COLOR
Plástico	Azul
Papel	Gris
Vidrio	Blanco
Latas	Naranja
Orgánicos	Amarillo
Basuras	Verde
Peligroso	Rojo

Fuente: Instituto Colombiano de Normalización y Certificación.

- **Cultura.** La cultura o comportamiento de las personas se ve influenciada por la correcta información y comunicación para el manejo adecuado y separación de los residuos sólidos en la fuente, por lo cual se deben seleccionar mecanismos concretos, como afiches informativos, cartillas educativas, videos educativos, correos electrónicos de sensibilización e información, documentos publicitarios y científicos respecto al tema, así como campañas de concientización. Los mecanismos más importantes son aquellos que logren cambiar el comportamiento de los miembros de la organización, seguidos por la capacitación al personal que hará el manejo de los residuos, para mantener segregados los materiales hasta su entrega a la cadena productiva. A cada uno de estos mecanismos se le debe evaluar su efectividad de acuerdo con cada uno de los actores, la frecuencia de realización del mismo y el nivel de detalle de información que se presente. Cada uno de estos mecanismos ofrece ventajas y desventajas, por lo cual se deben emplear combinaciones de mecanismos con el objeto de lograr la optimización entre ellos, alcanzando una sinergia que permite el

cambio cultural. La cultura se debe trabajar junto con la divulgación.

#### Reducción de la incertidumbre

Con el objeto de diseñar los nuevos escenarios futuros se deben analizar los factores de impacto, los cuales se dividen en factores móviles y externos, también llamadas variables dinámicas porque cambian a través del tiempo.

Los factores móviles son aquellos que son dinámicos en el tiempo o que cambian a lo largo de éste, como la población, la infraestructura, las actividades o servicios que se prestan, o la apropiación cultural.

- **Población.** Hace referencia al número de personas que integran la organización y que afectan los factores internos, ya que demandan mayor cantidad y amplitud de las instalaciones físicas y recipientes de recolección, pues la cantidad de los residuos generados aumentará, así como el posible desarrollo de más actividades; en la medida en que esto ocurra los recipientes de recolección deberán ser de mayor tamaño, la recolección más frecuente, los depósitos de almacenamiento más grandes y las campañas de divulgación deberán tener mayor alcance, por lo que la cadena productiva presentará cambios en las operaciones de selección y en la tecnología de procesamiento.
- **Expansión física de la organización.** Con el crecimiento de las instalaciones físicas puede aumentar el número de recipientes de recolección y requerirse una distribución diferente; no necesariamente hay aumento en los residuos generados, sino mayor dispersión de éstos, rutas de recolección más extensas y más puntos de información, lo cual puede llegar a impactar el factor financiero.
- **Expansión de las actividades o servicios de la organización.** Un incremento de las actividades propias de la razón de ser de la organización presume un aumento en su población y posiblemente una expansión de la planta física, influenciando los cambios relacionados con éstas. Tanto la expansión física como la de servicios están asociadas a la densidad de personas y la necesidad de una distribución adecuada de recipientes.
- **Apropiación cultural.** El cambio en el comportamiento hacia el reciclaje se produce gradualmente. El objetivo es que cuando se empiece a implementar el modelo se recupere el 50% de los residuos, en la etapa intermedia el 70% y finalmente el 90%. El cambio cultural permitirá reducir el tiempo de selección de los materiales, utilizar mejor los recipientes, disminuir la mano de obra en las operaciones de limpieza y segregación, y aumentar la cantidad de material recuperable que no era posible por la contaminación. El cambio cultural es el que más influencia los resultados esperados, sumado a que facilita el desarrollo del modelo, generando una mejora en la calidad de vida de la comunidad. Los factores externos son aquellos que afectan el modelo y dependen de aspectos externos como el mercado y la legislación.
- **Mercado.** Tiene influencia en los precios de venta de los materiales reciclables, la introducción de materiales sustitutos, la oferta de tecnología para el procesamiento de los materiales recuperados, la distribución y creación de nuevos centros de acopio, el aumento de industrias orientadas a cadenas ecoproductivas. La tendencia ecológica para consolidar los ciclos cerrados llevará a que los productos ecológicos sean más demandados y permitirá la creación de nuevas alternativas de reciclaje de materiales, que finalmente repercutirán en cambios en las actuales cadenas productivas y en el diseño de nuevos productos, convirtiéndose en una palanca del desarrollo social y empresarial.
- **Legislación.** Es la medida impositiva que obliga a una organización a actuar con determinados criterios. En muchos países la legislación ambiental ha impulsado cambios en los procedimientos utilizados para la producción, la comercialización y el consumo. Hay bienes excluidos del impuesto de valor agregado y de renta líquida (artículos 424-5 y 428 del Estatuto Tributario), bienes e importaciones que no causan impuesto sobre las ventas (incluido a través de la Ley 223 de 1995 y la Resolución 0486 de 2002, artículo 158-2 del Estatuto tributario), deducciones por inversión en control y mejoramiento del medio ambiente (incluido a través de la Ley 223 de 1995 y modificado por la Ley 788 de 2002, Decreto 3172 de 2003 y Resolución 136 de 2004) (Acercar, 2008), todo con el

propósito de incentivar cambios organizacionales para el menor impacto ambiental.

#### Articulación de la prospectiva y la estrategia

Los factores móviles y externos permiten determinar diferentes *escenarios futuros*. Utilizando el mismo método de relación de factores en la matriz de doble entrada, se determinan los nuevos factores en el cuadro de motricidad y dependencia que permiten establecer los factores de la zona de poder, teniendo en cuenta cómo dichos factores móviles y externos influyen la relación de los factores en análisis. Con los nuevos factores de la zona de poder se establecen planes de trabajo para el mejor escenario, el cual será el que se implemente. Este plan de trabajo debe determinar las actividades concretas que se deben desplegar para el desarrollo de los dos factores más importantes, donde se asignen los responsables de llevar a cabo dichas actividades y los tiempos de inicio y finalización de éstas, con el propósito de conseguir el objetivo cuantificado que se ha propuesto en un horizonte de tiempo.

En el ejercicio de aplicación se determinó que los *nuevos factores en la zona de poder son los residuos y los generadores*. Los residuos son el factor predominante, ya que son éstos los que deben segregarse en condiciones determinadas para lograr venderlos a la cadena que ofrezca mayor valor; como cada vez hay mayor escasez de dichos recursos, entonces cada día tendrán mayor valor. Para este factor se deben determinar los recipientes que se requieren, de acuerdo con el volumen en los diferentes puntos, a través de un modelo de optimización de ruta crítica, se establecen la cantidad de recipientes necesarios y su ubicación, para garantizar que los generadores o miembros de la organización encuentren un lugar cercano para su depósito. De acuerdo con la cuantificación de cada uno de los residuos, se busca un proveedor o empresa recicladora para venderlos; debido a que se recogen volúmenes mínimos se requiere la adecuación de áreas de almacenamiento para cada tipo de residuo, buscando garantizar las condiciones de reutilización.

El segundo factor son los generadores, los que como población cambiante requieren una apropiación cultural. Se debe hacer un proceso de sensibilización desde que se empiezan a realizar cambios físicos para que se dé inicio a un nuevo cambio de comportamiento. Se deben hacer varias actividades y usar diferentes mecanismos

para que lleguen a todos los niveles de la organización. Se pueden usar mecanismos como charlas informativas, ciclo de cine relativo al área ambiental y específicamente documentales sobre el manejo de residuos, capacitaciones para el manejo y almacenamiento de residuos, o correos informando beneficios de los procesos de aprovechamiento de residuos. El mismo día en que finalice la instalación de recipientes de separación de residuos hay que iniciar una campaña de separación en la fuente, la cual puede utilizar mecanismos como mimos y carteles explicativos para segregación de cada tipo de residuo, con el propósito de invitar a reciclar e informar los beneficios que se logran con dicho proceso.

Como *factores de resultado se encuentran los beneficios y la cadena productiva*. Los beneficios serán palpables desde lo económico y lo ambiental, y la cadena productiva mostrará beneficios sociales amplios al generar nuevos empleos. Si los miembros de la organización se retroalimentan permanentemente con los resultados del modelo, se verán incentivados a lograr mayores resultados; igualmente, con el objeto de mantener una campaña dinámica, se pueden publicar sus resultados por diferentes zonas, buscando cada vez mejores resultados y premiar aquella área que se haya distinguido por ser líder en el desarrollo de la campaña y en la obtención de resultados palpables.

#### RESULTADOS Y ANÁLISIS

La priorización de factores es indiscutible a través del uso de la perspectiva, lo que se evidencia en el ejercicio de aplicación, donde se empezó con la identificación de diez factores, y luego de determinar la motricidad y dependencia se pasó a trabajar en la zona de poder con tres; finalmente, después de considerar los factores móviles y externos, se redujo a dos. Dicha priorización permite enfocar los esfuerzos en los aspectos más relevantes para lograr la máxima ganancia o beneficio.

Los factores de motricidad, los cuales son la causa para que se obtengan resultados preponderantes para iniciar la marcha del modelo, están cifrados en los residuos, la cultura y las políticas. El que tiene mayor influencia son las *políticas*, ya que afectan a los otros factores. La *cultura* es un comportamiento de cambio gradual. Una vez que se inicie el cambio de comportamiento, éste será progresivo hacia la valorización de los residuos, se acentuará cada vez más e involucrará

a más personas. En tercera instancia están los *residuos*, cuya caracterización permitirá establecer las cadenas productivas y las condiciones en las cuales se deben segregar para cumplir con las condiciones de venta que se requieren para su aprovechamiento.

Después de introducir los factores móviles y los externos, se torna preponderante el factor de residuos, ya que éstos se ven influenciados por el mercado y la legislación, es decir, que el factor que recibe mayor influencia externa se convierte en el predominante a largo plazo. Y las políticas siguen desempeñando un papel importante, ya que serán las que incentiven el comportamiento hacia el logro de los resultados, influenciando a todos los actores, así como todos los factores.

Los modelos financieros de donación y venta de residuos se convierten en la mejor propuesta para organizaciones que no generan grandes volúmenes. Se pueden buscar proveedores para vender los residuos o buscar una asociación de recicladores legalmente constituida para donarlos y poder recibir beneficios tributarios.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Cada vez que se aplique la metodología descrita puede variar el resultado que se obtenga, de acuerdo con quienes intervengan y con el contexto en que se aplique, pero seguramente dicha variación no será de una manera muy drástica, pues la impresión en torno a los residuos y su valoración en todas las culturas han tenido el mismo objetivo: aprovecharlos. Este modelo no es sólo aplicable a organizaciones, sino que se puede extender a comunidades, teniendo en cuenta que los actores serán un número mayor y la población y el área de influencia aumentarán.

Definitivamente el modelo de gestión de residuos es el resultado del análisis de varios factores mirados desde la óptica de movilidad y dinamismo de escenarios futuros. Es el producto de la opinión de varios expertos y actores que participan, y así mismo logran involucrarse con la implementación del escenario más favorable. Esta multiplicidad de puntos de vista enriquece la pluralidad de aspectos que hay que considerar en el presente y en el futuro.

El beneficio económico para la organización que implementa el modelo no está cifrado sólo en la venta de

los residuos, sino en el ahorro obtenido por el servicio de aseo. El beneficio para la cadena productiva está en que genera empleo al grupo de personas que recuperan dichos materiales. El beneficio para el sector industrial está centrado en que se reciben materias primas que ofrecen mayor eficiencia que las materias primas de extracción natural. Todo lo anterior permite la creación de un ciclo cerrado que minimiza el impacto al medio y a la salud de la comunidad, garantizando una mejor calidad de vida a los actores y desarrollo a las naciones.

La clave para que el modelo trabaje está en el funcionamiento de todos los componentes, pero definitivamente el punto inicial está en el control de la fuente, donde los usuarios (generadores) vean las ventajas de su segregación y clasificación, por lo cual la responsabilidad de los resultados de reciclaje no debe recaer en los operadores de aseo y su recolección.

Definitivamente, en el contexto general aún no hay políticas claras que incentiven la minimización, reutilización y reciclaje de los materiales; tampoco hay claridad sobre las condiciones que deben tener los residuos para aprovecharlos, ni mucho menos cultura o ejemplos cercanos que se quieran acoger.

Por otro lado, la ganancia está cifrada en la cantidad de materiales que se evite disponer en rellenos sanitarios y así aprovecharlos, pero igualmente es importante que la concentración (densidad) de éstos sea alta para que los costos de transporte sean los mínimos posibles.

La descripción del modelo, con todos los actores externos donde se desarrollan las cadenas productivas y los precios de cada uno de éstos en las diferentes etapas de la cadena, desde recicladores, centros de acopio o reciclaje intermedios, hasta centros de acopios industriales y empresas, permite ampliar los beneficios macroeconómicos (Rodríguez, 2007) que se obtienen cuando las organizaciones implementan modelos de gestión de residuos sólidos.

## Reconocimientos

El desarrollo de este modelo fue posible gracias a la financiación de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Este es el resultado de la construcción de conocimiento de grupos de estudiantes que participaron en semilleros de investigación y trabajo dirigidos, hasta lograr la implementación de un plan piloto que validara los resultados obtenidos.

## REFERENCIAS

- Acercar (2008). Incentivos tributarios. Disponible en línea: <http://www.acercar.org.co/industria/apoyo/incetivo>\_Consultado mayo 2008.
- Bahri, Girum (2005). *Sustainable Management of Plastic Bag Waste*. IIIIEE. Lund University.
- Godet, Michel (1993). *De la anticipación a la acción, manual de prospectiva y estrategia*. España: Ed. Alfaomega-Marcombo.
- Godet, Michel (2004). *Prospectiva estratégica*. España: Ed. Alfaomega-Marcombo.
- Instituto Colombiano de Normalización y Certificación (2006). *Guía para la separación en la fuente, GT024*. Comité de normalización de Residuos Sólidos.
- Parody, Gina (2007). Proyecto de ley "basura cero". Bogotá: Senado de la República, mayo.
- Rodríguez, Luz Angélica (2007). Cadenas productivas para el aprovechamiento de residuos sólidos. Incorporación de los recuperadores a la solución. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería*, No. 67, pp. 57-68.
- Superintendencia de Servicios Públicos (2008). Plantas de reciclaje resultan costosas para el país. *El Tiempo*, 21 de marzo.
- Swedish Environmental Protection Agency (2008). Policy instruments for sustainable waste management. Sweden.
- Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos (UESP) (2007). Vida útil del relleno de Doña Juana se está acortando por basuras que recibe de Cundinamarca. *El Tiempo*, 10 de enero.



# Agrupamiento difuso para investigar información asimétrica: una aplicación a la utilización de los servicios de salud

CARLOS ALBERTO CANO PLATA

carlos.cano@utadeo.edu.co.

Profesor investigador de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Administrador de empresas de la Universidad Nacional de Colombia. Especialista en derecho empresarial de la UNAB. Magíster en administración de empresas de la Universidad Nacional de Colombia. Asesor en seguridad social.

EDUARDO ANTONIO CANO PLATA

ecano@ieee.org.

Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia y doctor en ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Profesor asociado y miembro del Grupo de Investigación de Redes de Distribución y Potencia de la Universidad Nacional, sede Manizales.

CÉSAR ARANGO LEMOINE

carangol@unal.edu.co.

Profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero electricista de la Universidad Nacional. Especialista en sistemas de distribución. Grupo Gredyp.

Artículo recibido: 28/05/2008

Evaluación: 02/06/2008

Aprobado: 20/06/2008

## Resumen

La lógica difusa con el método de agrupamiento borroso (Fuzzy Clustering Method) se empleó para discriminar las variables en el servicio de salud, utilizando información derivada de una encuesta aplicada directamente a los pacientes. Los grupos apropiados se hallan usando la suma cuadrática de las distancias cargadas entre los puntos de referencia y los prototipos del grupo. La información recolectada *a priori* se integró en el algoritmo que agrupa, empleando un prototipo obligado. Un grupo se constituyó utilizando una función de decisión. El método apropiado para tomar la decisión se encontró mediante un análisis del componente principal que usa el procedimiento de agrupamiento difuso, que mostró ser una manera confiable de identificar la estructura de la relación paciente-médico.

**Palabras claves:** agrupamiento borroso, asimetría, salud.

## Abstract

Fuzzy Clustering Method was used to discriminate the variables in the health service, using information derived from a survey applied directly to patients. The appropriate groups were found using the quadratic sum of the loads among different benchmarks and prototypes of the group. The "a priori" information collected was incorporated into the algorithm. A group is constructed using a decision. The method for making the decision was the principal component in the fuzzy clustering procedure, which was shown to be a reliable way to identify the structure of patient relationship with the doctor.

**Keywords:** fuzzy clustering, asymmetry, health.

## INTRODUCCIÓN

De la teoría de señales en los sistemas dinámicos, se tiene que extraer la información (análisis) proveniente de una encuesta no selectiva, fundamental para la evaluación de parámetros que ayudarán, de un modo u otro, a la toma de decisiones. Estas características o parámetros de la señal se deben resaltar y, además, ordenar [1].

Existen diferentes herramientas econométricas para este propósito: los mínimos cuadrados (LS), Método no Paramétrico (NP), Método Binomial Negativo (Negbin-2), y el Método Generalizado de los Momentos (GMM), conocido ampliamente como técnica de clasificación [2].

La técnica de *clustering* permite agrupar en un espacio  $n$ -dimensional las características de una señal [1,3].

Por ejemplo, el método de *clustering* se ha usado ampliamente en la discriminación de patrones de bebidas y licores en la industria de alimentos [4]. Shao y Wu [5], que describen el problema de regresión para determinar el número de *clusters*, proponen un criterio para seleccionar el número de regresiones en un hiperplano, con probabilidad de seleccionar todas las secuencias de clasificación cuando el número de observaciones tiende a infinito; a su vez, David Giles y Rober Draeseke [6] han utilizado un arreglo de cinco factores para modelar la relación años-ingresos empleando econometría difusa con el método de *clustering*.

En este capítulo se empleará el Fuzzy  $c$ -means (FCM) y el algoritmo de Gustafson-Kessel [7] para la clasificación y selección de los factores que inciden en la toma de decisiones por parte de los pacientes en el momento de asistir al médico.

## AGRUPAMIENTO DIFUSO

El propósito de análisis del *cluster* es la clasificación de objetos según las similitudes entre ellos, así como la organización de los datos en grupos. Un *cluster* es un grupo de objetos muy similares. En los espacios métricos, la similitud se define a menudo por medio de la distancia basada en la longitud de un vector a un punto del conjunto de datos que formará el *cluster*. Los centros de estos grupos no tienen una relación inicial (no se conocen de antemano), lo que hace que el algoritmo busque su iniciación efectuando una partición de estos datos de manera aleatoria. Por consiguiente,

la técnica de *cluster* busca una agrupación de los datos, sin que éstos se conozcan *a priori* para identificar las clases. Los puntos de inicio (centros, prototipos o *crips*) deben ser vectores de la misma dimensión de los otros datos, pero éstos se definen como objetos geométricos de alto nivel, tales como espacios funcionales, lineales o no lineales [8]. Dado que los *clusters* pueden verse formalmente como un subconjunto de datos, un posible método de la clasificación es basarse en la teoría clásica de conjuntos y decir entonces así que un elemento está o no incluido dentro de un *cluster*. Los métodos FCM [9] (de su sigla en inglés Fuzzy Clustering Methods) tienen la ventaja sobre la lógica de conjuntos porque un elemento puede estar incluido en varios *clusters* simultáneamente, con diferentes grados de pertenencia. El conjunto de datos  $Z$  se divide, entonces, en  $c$  subconjuntos difusos.

En muchas situaciones reales, el *cluster* difuso es mucho más natural que la teoría de conjuntos convencional, puesto que los objetos que se encuentran en las fronteras de estos *clusters* no necesariamente se pueden forzar a pertenecer a uno de ellos; por esto, dicho problema de la frontera se puede resolver asignando un grado de pertenencia entre cero y uno (0 y 1) que indicará una pertenencia parcial.

En esta tesis se considera la cuantificación de datos a través de *clustering* difuso.

Los datos que se utilizan son un ordenamiento, resultado de la observación de una encuesta. En términos generales, cada observación consiste en la medida de  $n$  variables, que se agrupan en un vector  $n$ -dimensional columna  $z_k = [z_{k1}, \dots, z_{kn}]^T$ ,  $z_k \in \mathfrak{R}^n$ . Así, un conjunto de  $N$  observaciones se denotará por  $Z_k = \{z_k/k = 1, 2, \dots, N\}$ , que se puede representar por una matriz  $n \times N$ :

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1N} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

En la terminología de reconocimiento de patrones, los objetos  $v_i$  son los centros del grupo que se va a caracterizar [2], la columna de  $Z$  son llamados patrones y las filas de  $Z$  son llamadas atributos; a  $Z$  se le conoce con el nombre de la matriz de patrones.

El objetivo de *clustering* es dividir el conjunto de datos  $Z$  en  $c$  *clusters*. La matriz de  $c \times N$ ,  $U = [\mu_{ik}]$  representa la partición difusa de los elementos que satisfacen las siguientes condiciones:

$$u_{ik} \in [0,1] \quad 1 \leq i \leq c, 1 \leq k \leq N \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1, \quad 1 \leq k \leq N \tag{3}$$

$$0 < \sum_{k=1}^N \mu_{ik} < N, \quad 1 \leq i \leq c \tag{4}$$

Donde  $c$  es el número de los *clusters* difusos y  $\mu_{ik}$  denota el grado de pertenencia, de  $z_k = [z_k, \dots, z_{nk}]^T$  - la observación del  $i$ -ésimo *cluster* estará entre  $1 \leq i \leq c$  conjunto.

El objetivo del modelo de FCM [9-10] es minimizar la suma media cuadrática ponderada de las distancias  $D_{i,k}^2$  : los puntos  $z_k$  y el centro del *cluster*  $v_i$ ; las distancias  $D_{i,k}^2$  son ponderadas con el valor de pertenencia  $\mu_{i,k}$ .

Por consiguiente, la función objetivo es:

$$J(Z, U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^N (\mu_{ik})^m D_{i,k}^2 \tag{5}$$

Donde  $U = [\mu_{ik}]$  es la matriz de partición difusa de  $Z$ ,  $V = [v_1, v_2, \dots, v_c]$  es el vector de centros, *crips* o patrones de los *clusters*,  $m \in (1, \infty)$  es un exponente de ponderación que determina el grado de borrosidad del clusters; a menudo se toma  $m = 2$ ,  $D_{i,k}^2$ , que se pueden determinar eligiendo una norma apropiada, por ejemplo la  $A$ -norm [8].

$$D_{ik}^2 = \|z_{k_i} - v_i\|_A \sqrt{(z_k - v_i)^T A (z_k - v_i)} \tag{6}$$

La minimización del funcional *c-means* (ecuación 8) representa un problema de optimización no lineal que puede resolverse usando cualquiera de los métodos disponibles [10]. El método más popular, sin embargo, es la optimización alterna (AO), conocido como FCM-AO (por su sigla en inglés Fuzzy c-means alternating optimization), el cual se resume en la tabla 1.

Los puntos utilizados como *crips*, en el FCM, producen los *clusters* esféricos (correspondientes a la  $A$ -norm). Pueden obtenerse diferentes formas del cluster con la

selección de normas diferentes, como lo sugerido en el algoritmo de Gustavson-Kessel [7], o con los tipos diferentes de partición, por ejemplo, las variedades funcionales lineales (FCV) [10], donde los *clusters* son subespacios lineales del espacio de rango. Una variedad lineal  $r$ -dimensional la define el vector y su dirección. En este caso, la distancia entre los datos y el *cluster*  $i$ -ésimo es:

$$D_{ik}^2 = \sqrt{\|z_k - v_i\|^2 - \sum_{j=1}^r ((z_k - v_i)^T A s_{ij})^2} \tag{7}$$

La correspondiente variedad funcional *c-means* difusa para la optimización alterna (FCV-AO), planteada para determinar los centros  $v_i$  en el paso 1 (tabla 1), computa las direcciones de  $s_{ij}$  como el eigenvector (vector propio) unitario del eigenvalor (valor propio)  $r$  más grande de la matriz difusa:

$$S_{iA} = A^{\frac{1}{2}} \left[ \sum_{k=1}^N \mu_{ik} (z_k - v_i)(z_k - v_i)^T \right] A^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

Si  $r=1$ , esto produce los algoritmos *c-lines* (FCL) y algoritmo de FCL-AO.

La partición automática de la matriz se produce por el algoritmo de Gustafson-Kessel; esta es una manera natural de determinar los radios relacionándolos con el tamaño de los *clusters*, lo que puede lograrse considerando la matriz de covarianza:

$$P_i = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_{ik}^c (z_k - v_i)(z_k - v_i)^T}{\sum_{k=1}^N \mu_{ik}^m} \tag{9}$$

El determinante  $|P_i|$  de la matriz de covarianza del *cluster* da el volumen de éste. Puesto que  $P_i$  es una matriz definida positiva y simétrica, puede descomponerse tal que  $P_i = Q_i \Lambda_i Q_i^T$  donde  $Q_i$  es ortonormal y  $\Lambda_i$  es diagonal con elementos no ceros  $\lambda_{i1}, \dots, \lambda_{in}$ , permitiendo que el volumen de los *clusters* se extienda una distancia de  $\sqrt{\lambda_{ij}}, j = 1, 2, \dots, n$  a lo largo de cada eigenvector  $q_{ij}$ . En el caso unidimensional, esta opción implica que en el *crip* o centro del *cluster* se extienda una desviación normal del centro del *cluster*. En el caso multi-dimensional,

el tamaño del radio en cada dirección es se determina midiendo las distancias a lo largo de las coordenadas transformadas según

$$\sqrt{\Lambda_i} Q_i^T A_i Q_i \sqrt{\Lambda_i}, \tag{10}$$

Donde  $\sqrt{\Lambda_i}$  representa una matriz cuyos elementos son iguales a la raíz cuadrada de los elementos  $\Lambda_i$ . Cuando se induce una norma diferente dada por la matriz de la covarianza, se obtendrán distintos valores para el radio. En este caso, se puede determinar con un valor inicial promedio, como se discutirá más adelante. La forma del volumen de los *crips* o prototipos es igual a la forma del *clustering* inducido por la distancia métrica. Cuando se emplean distancias euclidianas para el algoritmo FCM, los *crips* y sus hiperformas se muestran en la figura 1.

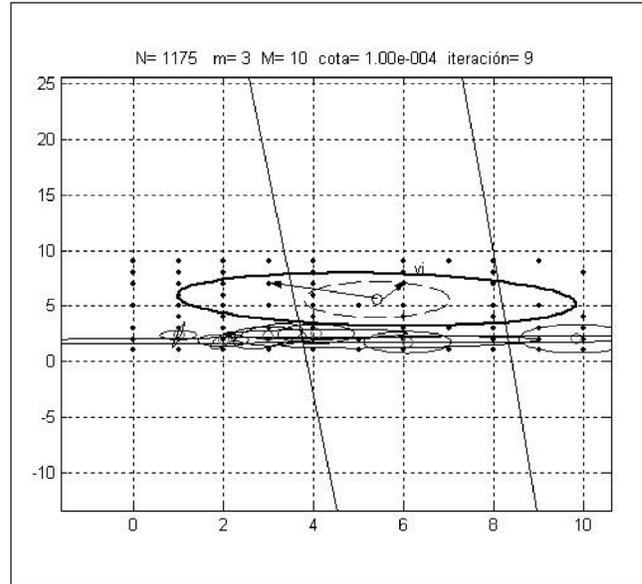


Figura 1. Geometría de las distancias.

Tabla 1  
Algoritmo generalizado para *cluster* difuso

<p>La inicialización: Dado un conjunto de datos <math>Z</math>, seleccionar el número de <i>clusters</i> <math>c</math>, el exponente ponderado <math>m</math> y el criterio de tolerancia <math>\varepsilon \leq 0.001</math> e inicializar la partición de la matriz al azar.</p>	
<p>Paso 1: determinar los centros de los <i>clusters</i>:</p> $v_i^{(1)} = \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{ik}^{(1)})^m z_k}{\sum_{k=1}^N (\mu_{ik}^{(1)})^m}, 1 \leq i \leq c$	<p>(11)</p>
<p>Paso 2: calcular las distancias</p> $D_{ik}^2 = \ z_k - v_i\ ^2 = \sqrt{(z_k - v_i)^T A (z_k - v_i)}, 1 \leq i \leq c, 1 \leq k \leq N$	<p>(12)</p>
<p>Paso 3: reorganizar nuevamente la matriz de partición con las siguientes reglas: Si <math>D_{ik} &gt; 0</math> para <math>1 \leq i \leq c, 1 \leq k \leq N</math>,</p>	<p>(13)</p>
<p>entonces:</p> $\mu_{ik}^{(1)} = \frac{1}{\sum_j \left( \frac{D_{jk}}{D_{ik}} \right)^{2/m-1}}$	<p>(14)</p>
<p>De otra forma: <math>\mu_{ik}^{(1)} = 0</math></p>	<p>(15)</p>
<p>hasta <math> U^{(l)} - U^{(l-1)}  &lt; \varepsilon</math></p>	<p>(16)</p>
<p>Repetir para <math>i = 2 \dots</math> hasta <math>l</math></p>	

**Experimento**

Se hizo el arreglo de una encuesta de un grupo de población utilizando muestreo aleatorio simple para poblaciones infinitas, con el propósito de detectar información asimétrica y factores que expliquen la decisión de visitar al médico general por parte de los pacientes. Se hicieron cuatro preguntas, aplicadas a una distribución normal dentro de la población escogida; las preguntas se direccionaron a diferentes tipos de población, de acuerdo con su discriminación socioeconómica en el eje cafetero, estratos I, II, III, IV, V, VI, respectivamente. Las variables socioeconómicas se determinaron de manera experimental, utilizando técnicas difusas; los datos extraídos del nivel tres se analizaron para ver su flujo en cuanto a variables endógenas y variables inobservables, y la interferencia del muestreo. Se construyó una tarjeta de datos manualmente para entregarla a un programa de computador desarrollado en Matlab 6.1 [11], cuyo objetivo es medir el cambio en la distribución. La característica de la ecuación se presenta en el apéndice A, para detectar asimetría, como se ha dicho; la encuesta también se aplicó a un grupo de médicos.

**Relación entre el método de clustering difuso y el arreglo formulado por la encuesta**

Se empleó el algoritmo de *clustering* difuso para detectar información de las señales respecto de cada pregunta formulada a partir de la encuesta, lo que se denomina sensor y señal, respectivamente. La visita o la decisión que tomó cada individuo encuestado se analizó a través de cuatro preguntas simultáneas, que tuvieron diferentes respuestas en relación con la visita al médico; dependiendo de la cantidad de preguntas a la encuesta, el rango se obtuvo entre 0,1 y 1 normalizado, utilizando el criterio de entropía [12], o lo que es lo mismo, del 0,01 al 100%; se tomó el resultado natural de cada respuesta, sumando cada componente del vector y dividiendo cada componente por este resultado, entonces se obtienen las valoraciones normalizadas. Éstas se agruparon en cuatro vectores columnas, con respecto a un solo experimento; la relación de las frecuencias medidas es una característica y puede usarse para discriminar factores de decisión referente a ir al médico. Entonces, cuando se evalúe el k-ésimo el programa computacional leerá cuatro valores de frecuencia:

$$z_i = [H_i, I_i, G_i, S_i]^T, z_i \in \mathbb{R}^4 \tag{17}$$

Donde:

- H = estado de salud
- I = cubrimiento de seguro individual
- G = demográfica
- S = estatus socioeconómico

Estas variables no necesitan caracterizarse, puesto que surgen de manera natural de la relación lingüística de la encuesta.

**Resultados y discusión**

**Identificación de cuatro factores utilizando clustering difuso con el método de centros promediados FCM** (Fuzzy c-means clustering). El objetivo de utilizar este método es el reconocimiento de cuatro factores en las señales resultantes de la encuesta (figura 2). Por ello el número de factores escogidos es  $c = 4$  y el número de vectores  $Z_i$  es igual al número de sensores.

El número de observaciones es de 250 por cada factor, así que el tamaño de la matriz de patrones  $Z$  es (250 x 4 x 4); la ponderación del exponente  $m$  fue 2, con la idea de obtener una buena partición. Si se piensa hacer tender  $m$  hacia infinito, entonces  $v_{250i}$ ,  $i$  será el valor promedio del *cluster* donde el índice 250 denota el factor de distribución  $m$ , es decir, cuando  $m \rightarrow \infty$  la partición irá al máximo ( $C_{ik}/1 = \mu$ ). El factor para terminar  $\epsilon$  fue  $10^{-5}$ , el FCM se realizó utilizando Matlab 6.1 y el Fuzzy logic Toolbox [9].

Utilizando el algoritmo propuesto, se determina-

**Tabla 2**  
Factores explicativos de la toma de decisiones en cuatro experimentos (*crips* o centros)

Actores	Experimento	H	I	G	S
Médico	1	50,4455	2,3455	8,1238	4,2211
Paciente	2	5,5963	1,7797	1,5069	2,3440
Médico	3	6,5966	1,9735	2,0749	2,7313
Paciente	4	5,6108	1,8965	2,2286	2,5390

ron los centros que están resumidos en la tabla 2; la eficiencia de este algoritmo depende en gran forma de la matriz de inicialización, mientras que una función objetivo pequeña se logró para  $m=20$ ; la clasificación no ha observado falla para el análisis del seguro en salud, clase demográfica y estatus de salud; se discriminó bastante bien. Las funciones de pertenencia para  $m=20$  se muestran en la figura 2.

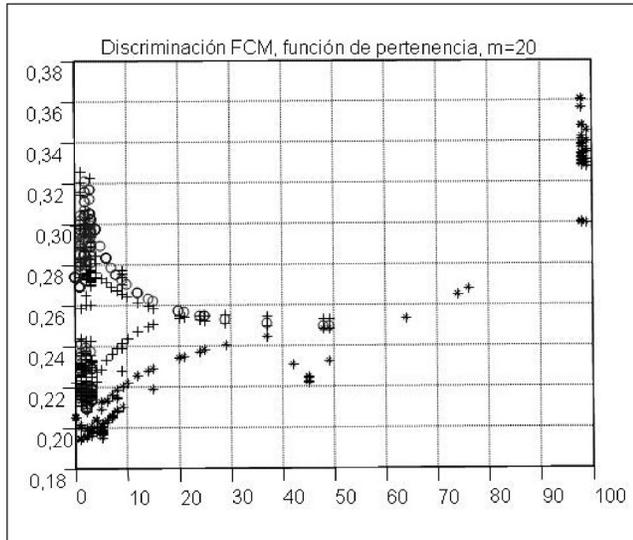
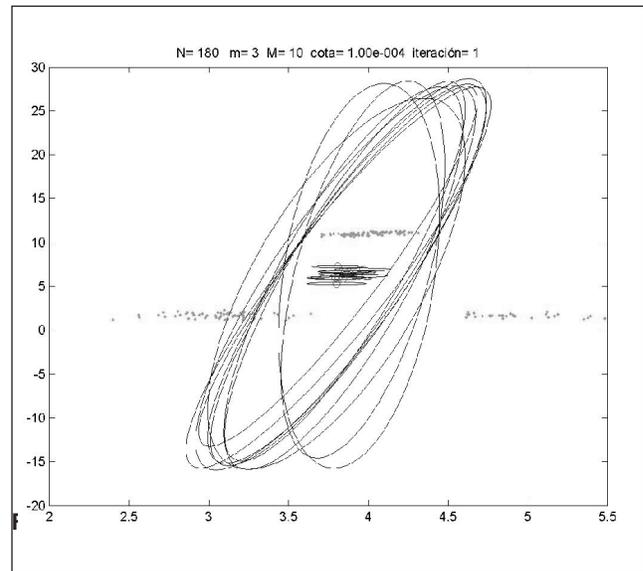


Figura 2. Discriminación FCM.

**Identificación de los cuatro factores utilizando el algoritmo Gustafson-Kessel.** El método Gustafson-Kessel se empleó también para identificar estas variables, pero falló cuando trataba de identificar variables entremezcladas; para resolver este problema se utilizó conocimiento *a priori* y luego se aplicó el método de Gustafson-Kessel; debido a la ecuación fundamental de Vera, las visitas al médico se pueden escoger a través de una ecuación dinámica positiva [13].

$$v_i = \exp(\beta G_i + \phi I_i) + u_i \tag{18}$$

Donde la función exponencial se emplea para identificar su positividad y  $u_k$  se refiere al error del funcional econométrico, que también incluye variables no observables.



Teniendo este conocimiento previo de los *clusters*, al ser de tipo exponencial, con radio igual a 1 y partiendo del origen; es decir, si  $\beta=0$  y  $\phi=0$ , en este caso  $s_{i1}$  tiene que ser igual a:

$$s_{i1} = \frac{v_i}{|v_i|} \tag{19}$$

Lo que nos muestra un valor propio unitario en la matriz difusa –ecuación (8) utilizando la ecuación (10)– se puede resolver de manera apropiada, incorporando este conocimiento *a priori*; de esta manera, hacer la partición o los *clusters* será rápido, pues no se tiene que resolver el problema de valores propios de la ecuación (8).

Se hicieron cuatro preguntas dentro de una distribución a cuatro experimentos, a poblaciones de 100, 200, 300 y 400 en la zona cafetera (figura 5); el número de *clusters* exponenciales fue igual al número de preguntas; se seleccionaron cien observaciones de cada grupo, haciéndose una matriz Z de (100 x 4 x 4); el peso del exponente y el factor de determinación fueron iguales a los del método anterior; el algoritmo Gustafson - Kessel se realizó utilizando también Matlab 6.1; el resultado del algoritmo, es decir, los centros, se resumen en la figura 3 y las funciones de pertenencia en la figura 4; al resolver la función objetivo no se observó ninguna pérdida en la clasificación.

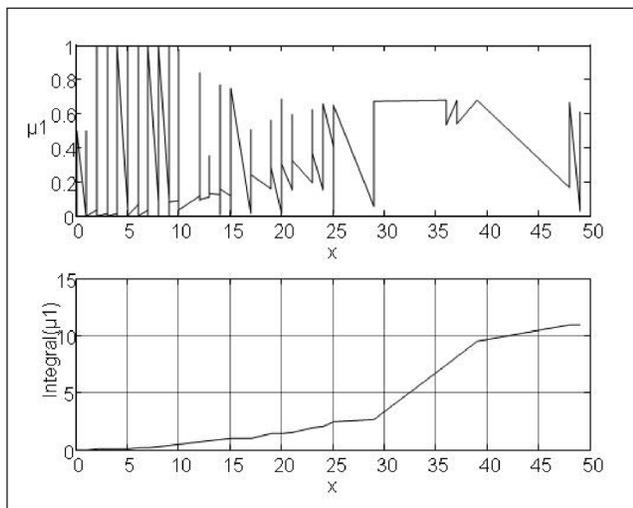


Figura 4. Función de pertenencia determinada por el algoritmo Gustafson-Kessel.

Determinación cuantitativa de las cuatro preguntas

Como se dijo anteriormente, el algoritmo FCM y el Gustafson-Kessel se utilizaron para cuantificar y clasificar en diferentes grupos información asimétrica; basándose en estos resultados, se puede determinar información asimétrica en cada una de las preguntas formuladas, como se muestra en la ecuación (9) (matriz de covarianza de los clusters) la señal obtenida a partir de la encuesta es directamente proporcional al grupo de preguntas formuladas; por ello, utilizando el *crip*, prototipo o centro entregado por el Gustafson-Kessel o por FCM para 250 personas examinadas, esto es, luego de obtener la mínima función objetivo,  $v_{i,250}$  la información asimétrica se puede estimar como:

$$q_i = \frac{|z_i|}{\min |v_{i,250}|} \cdot 250 \tag{20}$$

Donde  $q_i$  indica el grado de desviación para el grupo de pacientes observados.

$$q_j = \frac{|z_j|}{\max |v_{i,250}|} \cdot 250 \tag{21}$$

Y  $q_j$  indica el grado de desviación para el grupo de médicos observados

Así se obtienen los datos que se muestran en la tabla. 3.

Tabla 3  
Grado de desviación o asimetría del cluster

Parámetro del seguro	$q_i$	$q_j$
Grado de desviación o asimetría del cluster	4,0910	1,8045
	4,2484	79,3625

Para demostrar la aplicabilidad de este método, la asimetría de la información en la relación paciente-médico se determinó utilizando las ecuaciones (20) y (21); el resultado se resume en la tabla 3. La desviación estándar de  $z_i$  que representa la información obtenida por la encuesta, es decir, información con contenido asimétrico, es igual a 57,8792, bastante similar al valor promedio extremo  $(q_i + q_j)/2$  que es igual a 40,58; la información asimétrica es, entonces, aproximadamente idéntica. Los valores característicos para salud, estatus social y demografía se clasificaron bastante bien en datos provenientes del eje cafetero. Se observó una mezcla en la encuesta en cuanto a la decisión del paciente (trazo punteado), fundamentada en el estado de salud, demografía y estatus socioeconómico. El método se aplicó dentro de los seis estratos socioeconómicos, solamente se resolvió el problema a través del método difuso. A pesar de que los valores propios en los grupos evaluados fueron diferentes, el estatus de salud fue bien clasificado y seleccionado; así mismo, se identificaron factores como pago de seguro y demografía.

Los valores propios de cada grupo con diferente estructura y posición en la zona colombiana seleccionada, tales como edad y sexo, fueron bien separados. Estas preguntas también se identificaron mediante el algoritmo FCM. El algoritmo Gustafson-Kessel probó ser bueno en las preguntas con similares estructuras, tales como salud y seguro; se distinguieron cuatro grupos a través del método de *clustering* difuso.

CONCLUSIÓN

La aplicación del método de *clustering* difuso tiene grandes ventajas en la determinación de factores que influyen en la decisión del paciente y propiedades, tales como demografía, estrato socioeconómico, estado de salud, etc. Sin embargo, no se puede conectar exactamente a la señal que entrega una encuesta, en un proceso de muestreo aleatorio simple. Se inspeccionó el tipo de respuesta y se analizó en estas condiciones. Se

incorporó conocimiento *a priori* observando mejoras en el algoritmo de *clustering*, la aplicación de los algoritmos FCM y Gustafson-Kessel probó ser una vía interesante para la clasificación y cuantificación de la asimetría, y de los factores que determinan la decisión de un paciente para visitar al médico.

Como puede observarse en la figura 1, la geometría que esboza el *cluster* en relación con el centro puede estar o no deformada; estas asimetrías se pueden asociar con la asimetría de la información. Esto se logró con la expresión presentada en (20) y (21) y haciendo un promedio de la valoración de los  $q_i$  contra los  $q_j$ .

El resultado se expresó en la tabla 2; los actores, en el marco del modelo principal-agente, muestran claramente teoría de información asimétrica, y es evidente que existe una variable no verificable en este contrato y que afecta en sentido contrario los intereses de los participantes en esta relación; esto se observa en los renglones impares de la tabla 2, que corresponden a los agentes. Los renglones pares corresponden a los principales, en la misma tabla 2; medir esta asimetría se logró utilizando las expresiones (20) y (21). En la tabla 3 se mostró el resultado al aplicar la evaluación de asimetría.

En el capítulo 2 se mostró la variable I como un elemento altamente influenciado por perturbaciones exógenas y variables ocultas, resultado de la politización. Esta situación queda detallada por el bajo porcentaje indicado en la columna de la tabla 3, concerniente a este parámetro. Aunque la metodología y el origen de datos en la tesis de Vera [1] permitirían valorar este resultado para España, pues osciló entre 4 y 16,5%, como lo acota él en la tabla 3 [1]. Para la evaluación realizada en el presente trabajo, vemos que los *críps* según Gustafson Kessel son de 1,8%, y según FCM se observó una variación de 1,77 a 2,34%. Esto es una evidencia de la diferencia entre la cultura del seguro que se vive en Colombia en relación con la española.

En este artículo se propone un relación geométrica proveniente del algoritmo de clasificación difuso, con el objeto de detallar los factores influyentes en la aplicación de una encuesta en relación con la visita del paciente al médico (se tuvo en cuenta también la calidad de paciente del médico), dando cumplimiento de esta manera al objetivo propuesto.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Duda, Peter E. Hart & David G. (1989). *Stork fuzzy control and fuzzy system*, Witold Pedrycz: Ed. Research Studie Press Ltd.
- [2] A Wiley Pattern, Richard O. (2000). *Interscience Classification Publication*.
- [3] Chin-Teng Lin & George Lee, C.S. (1995). *Neural fuzzy systems: a neuro-fuzzy synergism to intelligent systems*: Ed. Prentice Hall.
- [4] Kobayashi Toga A. & Aishima T. (1995). *Relating sensory properties of tea aroma to gas chromatographic data by chemometric calibration methods*, N. *Food Research International*, vol. 28, Elsevier Science Ltd., No. 5, pp. 485-493.
- [5] Shao Q., & Wu Y. (2005). *A consistent procedure for determining the number of clusters in regression clustering*. *Journal of Statistical Planning and Inference*, vol.135, Elsevier Science Ltd., pp. 461-476.
- [6] David E.A. Giles & Robert Draeseke. (2001). *Econometric Modelling Based on Pattern Recognition via the Fuzzy c-Means Clustering Algorithm*. Department of Economics, University of Victoria. Working Paper.
- [7] Kim Young-II, Kim Dae-Won, Lee Doheon, Lee Kwang H. (2004). *A cluster validation index for GK cluster analysis based on relative degree of sharing q*, *Information Sciences*, vol. 168, Elsevier Science Ltd, pp. 225-242.
- [8] Edwards R.E. (1995). *Funtional Analysis: theory and applications*. New York: Dover Publications, Inc.
- [9] Gulley N., Jang J. S.R. (2000). *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. Massachusetts: The Maah Works Inc.
- [10] Díez, José L., Navarro, José L. (2004). *Algoritmos de agrupamiento en la identificación de modelos borrosos*. Sala Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Valencia, CEA-IFAC.
- [11] The MathWorks, MATLAB 6.1, 2000
- [12] L.G. Ma. del Carmen & Fuentes M., Federico. *Tratamiento borroso del intangible en la valoración de empresas de internet*, <http://eumed.net/cursecon/librería/index.htm>.
- [13] Vera Hernández, Ángel Marcos (2001). *PhD Microeconomics and Asymmetric Information: "applications to health care utilization"*. Dissertation In economics: Universitat Autònoma de Barcelona Belalterra, March.

EDUCACIÓN

# El aprendizaje situado como una alternativa en la formación de competencias en ingeniería

## Segunda parte

HERNÁN PAZ PENAGOS

hernan.paz@escuelaing.edu.co.

Ingeniero electricista de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y filósofo de la Universidad Santo Tomás de Aquino. Magíster en teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Docente del área de comunicaciones, Programa de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Artículo recibido: 9/06/2008

Evaluación: 125/06/2008

Aprobado: 28/06/2008

### Resumen

Dado el interés de algunos docentes de ingeniería en la formación por competencias basada en estrategias de enseñanza diferentes de la clase magistral, tales como aprendizaje situado, enseñanza basada en resolución de problemas, enseñanza por proyectos, etc., continúo con la segunda parte de este artículo justificando las razones del cambio de paradigmas en la formación de ingenieros y proponiendo caminos alternativos de enseñanza para alcanzar el desarrollo humano del estudiante, que es el objetivo principal de la formación por competencias en ingeniería.

El artículo empieza con una revisión histórica y epistemológica de la enseñanza de la ingeniería en Colombia, construyendo respuestas frente a los siguientes interrogantes: ¿cómo se ha desarrollado la enseñanza de la ingeniería en Colombia a lo largo de su historia y en qué paradigmas ha estado enmarcada dicha enseñanza? ¿Cuál es el trasfondo de las prácticas pedagógicas actuales en la enseñanza de la ingeniería? ¿Cuáles son los modelos actuales y los problemas educativos asociados a dichos paradigmas en la enseñanza de la ingeniería en Colombia? ¿Cuáles son los principales retos de la educación en Ingeniería para el desarrollo del país? Termina destacando la importancia de la resolución de problemas y del aprendizaje situado como propuestas alternativas para la enseñanza de la Ingeniería.

### INTRODUCCIÓN

El modelo pedagógico actual de formación de ingenieros en Colombia está centrado en el docente con una visión educativa académica-cultural y tecnológica<sup>1</sup>. El docente ha explorado el saber disciplinar (objeto), lo conoce y lo transmite, pero centra su enseñanza en los contenidos y descuida el reconocimiento del estudiante (sujeto), el papel de éste en el proceso educativo y la pertinencia del saber enseñado.

### REVISIÓN HISTÓRICA Y EPISTEMOLÓGICA SOBRE LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA EN COLOMBIA

La universidad colombiana se construye no sólo por su actitud ante el futuro sino también por su postura frente al pasado, porque su memoria no es menos reveladora que sus proyectos; no se pueden comprender rigurosamente los paradigmas actuales de la enseñanza de la ingeniería si no se tiene un conocimiento histórico y epistemológico de su quehacer educativo. La historia

de la educación superior en ingeniería no es ajena a la historia de la universidad colombiana.

Como lo indican Parra y Carvajal en su ponencia sobre la universidad colombiana (1978), el comienzo de ésta, a partir de 1653, se caracterizó por una fuerte influencia del modelo medieval<sup>2</sup> de Salamanca, con un centro de interés en teología, filosofía y derecho, y algún interés secundario por conocimientos básicos de ciencias naturales (cirugía, farmacia y botánica). La tecnología más desarrollada que los españoles trajeron a la Nueva Granada fue la de la minería, que representaba su mayor interés económico en estas colonias, y de cuya tecnificación encargaron a ingenieros como Luis Vilegas y Avendaño, quien vino a dirigir las explotaciones de las minas de esmeraldas de Muzo. Durante los tres siglos siguientes a 1492, de dominación española en nuestro continente, se construyeron pocas obras de gran

magnitud en la Nueva Granada, todas relacionadas con la ingeniería militar (Poveda, 1976). La escasa ingeniería civil fue urbana, y consistió principalmente en caminos, puentes, palacios, templos y conventos. En la Colonia, los maestros se convirtieron en tales “como brotados del suelo”, abriendo escuelas en sus casas y cobrando semanalmente, por cada discípulo, un real, una vela y un pan (Martínez, 1984).

Más tarde, las ciencias cobraron importancia gracias a los esfuerzos de difusión realizados por José Celestino Mutis<sup>3</sup> en la Expedición Botánica<sup>4</sup> y seguidos, a principios del siglo XVIII, por sus discípulos Francisco Antonio Zea y Francisco José de Caldas.

A continuación se describe y caracteriza brevemente históricamente la creación de las facultades de ingeniería en el país.

**Tabla 1**  
Creación de las primeras facultades de ingeniería en el país

Creación de la Facultad de Ingeniería dentro de la institución universitaria	Enfoque pedagógico predominante	Tarea del maestro en la enseñanza y papel del estudiante en el aprendizaje	Comentario
<p>La <b>Academia de Ingenieros Militares</b> fue la primera Escuela Colombiana de Ingeniería. Se fundó en Medellín (tuvo su sede en el Colegio Franciscano) el 12 de abril de 1814 y la dirigió Francisco José de Caldas; en esta escuela se cursaban seis tratados<sup>5</sup>, además de aritmética, geometría clásica y analítica, trigonometría y álgebra.</p>	<p><b>Transmisor expositivo de conocimientos:</b> basado en el <b>modelo transmisionista</b>, también llamado <b>instruccional</b><sup>6</sup>, que se inspira en la pedagogía intuitiva, desarrollada por Comenio, Pestalozzi y Herbart. El aprendizaje es un acto de autoridad, en el cual el maestro es el experto y el estudiante toma la lección (Palacios, 1978).</p>	<p>El maestro era el actor principal del proceso y a quien le correspondía organizar el conocimiento (elaborar la materia que había que aprender), trazar el camino y llevar por él a sus alumnos (Pestalozzi, 1927). En este modelo había memorización, repetición, pero intentaba por lo menos partir del entendimiento del estudiante. La evaluación<sup>7</sup> era reproductora de conocimientos, explicaciones y argumentaciones previamente estudiados por el alumno en notas de clase o textos prefijados; incluía preguntas que indagaban por definiciones, por la evocación de informaciones y por la resolución de ejercicios que el estudiante había preparado a partir del estudio de ejercicios que se habían desarrollado en clase.</p>	<p>A pesar de las dificultades de la época, la escuela emprende las tareas de formación y capacitación técnica de los cuadros del arma en las especialidades de zapadores, pontoneros, transmisiones y ferrocarriles; además, realiza los primeros cursos formales de especialización para oficiales y suboficiales. Para el período de la república la actividad de la ingeniería estuvo ligada a la construcción de vías, por lo cual se expidió la Ley 12 de 1821 sobre caminos, medidas, postes y señalizaciones.</p>

Creación de la Facultad de Ingeniería dentro de la institución universitaria	Enfoque pedagógico predominante	Tarea del maestro en la enseñanza y papel del estudiante en el aprendizaje	Comentario
<p>La <b>Universidad Central</b>, fundada en Bogotá el 25 de septiembre de 1826 por Francisco de Paula Santander, fue la primera universidad pública y empezó con cinco facultades: Filosofía, Jurisprudencia, Medicina, Teología y Ciencias Naturales. Algunos años más tarde se crearon las escuelas de Medicina y de Ingeniería, que lograron afirmar estas profesiones en una dirección moderna (Bateman y otros, 1975).</p>	<p>La Escuela de Literatura y Filosofía se ocupó de los estudios generales y nutrió la enseñanza de las ciencias jurídicas, proporcionó instrucción básica en ciertas áreas de medicina y ciencias naturales, y dio cohesión metodológica y pedagógica a la universidad en su conjunto por el hecho de ocuparse del saber en su totalidad; también preparó a los estudiantes en los fundamentos de las artes y las ciencias, disponiéndolo racionalmente para la vida civil o para la especialización madura en una facultad mayor. Se impartió instrucción básica en matemáticas, geografía e historia y los principios de las ciencias naturales. Se adoptaron y aplicaron nuevas normas de recompensas y sanciones que excluían los castigos corporales, se amplió la biblioteca y se organizó un laboratorio de física para dar consistencia a la enseñanza de las ciencias naturales.</p>	<p>El instructor era un predicador de normas y valores que preparaba un ensayo y lo leía. El estudiante tenía que repetir de memoria el ensayo, sin tener en cuenta su nivel de entendimiento.</p>	<p>Hacia 1837 había en el país tres universidades: la <b>Universidad Central</b>, la <b>Universidad del Cauca</b> (1827) y la <b>Universidad de Cartagena</b> (1827); además, había 26 colegios y escuelas superiores, dos escuelas para niñas, unas 200 escuelas lancasterianas y 850 escuelas de enseñanza privada y pública (Torres y Salazar, 2002).</p>
<p>La <b>Universidad Nacional</b> de los Estados Unidos de Colombia fue creada por Antonio Vargas Vega mediante la Ley 66 de 1867, en pleno período radical; por su parte, la Facultad de Ingeniería se estableció por medio del decreto del general Tomás Cipriano de Mosquera que creó el Colegio Militar y la Escuela Politécnica en 1861; más tarde, la Ley 68 de 1935 trazó los parámetros que la guiarían de ahí en adelante. La universidad moderna ofreció especialización en ingeniería civil y amplió el quehacer universitario a la profesionalización en ingenierías específicas<sup>8</sup>.</p>	<p>En los <i>Anales de la Universidad Nacional</i> (1968) se afirma que se concibió originalmente como "escuela de método"; en ella dominaron, en sus inicios, el empirismo, la improvisación y la locuacidad; había un afán por el saber, sin medios para realizarlo; se planteó una reforma y quienes la propusieron estuvieron impregnados de un espíritu positivista. En su constitución se incluyó la Escuela de Artes y Oficios para estimular la capacitación de los artesanos en oficios industriales que demandaban entonces la construcción de ferrocarriles y algunos proyectos industriales (inicio de la Ingeniería Civil).</p>	<p>El docente universitario se convirtió en un entrenador o instructor que se dedicaba a la enseñanza de las técnicas; fundamentalmente como entrenamiento para el manejo de instrumentos, herramientas, maquinarias, o cuando mucho para su arreglo. En la primera mitad del siglo XX, la Universidad Nacional continuó como un centro de adaptación de los conocimientos técnicos y tecnológicos a las necesidades de la economía agroexportadora<sup>9</sup> del país.</p>	<p>Como el país había entrado a la era de los ferrocarriles, de las obras públicas, el telégrafo y los modernos servicios urbanos, la Ley 66 de 1867 daba una especial importancia a la enseñanza técnica. Entre 1930 y 1946 se crearon movimientos estudiantiles que cuestionaron la falta de actualización de los planes de estudio, la enseñanza pasiva, la carencia de preparación del profesorado y el clientelismo para su designación.</p>
<p>La <b>Universidad de Antioquia</b> se creó en 1822. El 10 de enero de 1872, con catorce estudiantes, se abrió la Facultad de Ingeniería. No hubo estudios de ingeniería desde 1911 hasta</p>	<p>Se mantuvo el modelo educativo mecanicista y autoritario.</p>	<p>Se propuso la creación de la carrera académica para profesores, basada en un sistema de clasificación que permitiera romper con la tradición de personas procedentes de profesiones</p>	<p>El pedagogo alemán Fritz Karsen influyó en la concepción de la universidad como un todo orgánico, integrado por facultades y por departamentos a los cuales deberían adscribirse</p>

Creación de la Facultad de Ingeniería dentro de la institución universitaria	Enfoque pedagógico predominante	Tarea del maestro en la enseñanza y papel del estudiante en el aprendizaje	Comentario
<p>1943. El 26 de enero de 1943 el Consejo Directivo de la Universidad de Antioquia creó la Escuela de Ciencias Químicas<sup>10</sup>. En la década de 1960 se amplió la Facultad de Ingeniería<sup>11</sup>.</p>		<p>como el derecho, la medicina o la política, que se dedicaban parcialmente a la docencia universitaria. Para atender las nuevas carreras de ingeniería que se crearon en 1969, se contrataron algunos profesores novatos, recién egresados de diferentes universidades, algunos de los cuales carecían de experiencia y hasta de título (Bateman y otros, 1975).</p>	<p>las diferentes áreas del conocimiento. Gracias a la llegada de ingenieros europeos<sup>12</sup> a partir de 1822, la minería antioqueña progresó entre 1825 y 1840, especialmente en la explotación de filón (Torres y Salazar, 2002).</p>
<p>Mediante la Ley 60 de 1886 se crearon dos escuelas de minería: la <b>Escuela Nacional de Minas</b> de Medellín y otra en Ibagué.</p>	<p>Las políticas universitarias en las primeras décadas del siglo XX se inspiraron en la Escuela Nueva, que abogaba por ofrecer una educación única, laica y gratuita; esto condujo a que el Estado asumiera los gastos financieros para la ampliación y fortalecimiento de las universidades públicas.</p>	<p>En este modelo la acción era la garantía del aprendizaje: "Se aprende haciendo". Se introdujeron modificaciones educativas con respecto al querer del estudiante (actitudes) y a lo que él aprende (contenidos).</p>	<p>En 1887 se suspendió la de Ibagué y quedó sólo la de Medellín, que se llamó Escuela Nacional de Minas; ésta se integró al desarrollo económico del país a través de la explotación de los recursos naturales.</p>
<p>La <b>Universidad Javeriana</b> fue reabierta por los jesuitas en 1931. En el año de 1950 se creó la Facultad de Ingeniería Civil; tres años después se integraron la Facultad de Ingeniería Civil e Industrial y la Facultad de Ingeniería Electrónica.</p>	<p>Tiene como fin específico la formación integral del hombre y la conservación, transmisión y desarrollo de la ciencia y de la cultura, trascendiendo lo puramente informativo y técnico.</p>	<p>El ingeniero debe establecer el puente entre la ciencia y la técnica. Diseña, proyecta y construye, pero también programa, mantiene y administra.</p>	<p>La comunidad religiosa jesuita se opuso a la orientación oficial de la Universidad Nacional en el nivel de la educación superior (Palacios, 1978).</p>
<p><b>Universidad Católica Bolivariana</b> (1936), <b>Universidad del Valle</b> (1945), <b>U. Industrial de Santander (UIS)</b>, <b>Universidad de Medellín</b> (1950) Estas universidades debieron acogerse a las normas dictadas por la Universidad Nacional, medida que tuvo resistencia en algunos grupos regionales, aduciendo un centralismo que atentaba contra los intereses regionales. En 1946 se creó la Facultad de Química Industrial, en la Universidad del Valle; dos años después se transformó en la Facultad de Ingeniería Química. En 1947 se creó la Facultad de Ingeniería Eléctrica y trece años más tarde se concretaron los proyectos de reforma universitaria; en esta misma época la universidad se organizó en divisiones, hoy facultades.</p>	<p>A partir de 1950 se introdujo la pedagogía conceptual que se orienta hacia la misión, visión y metas institucionales, así como hacia sus planes de estudio y sus modelos pedagógicos. Este modelo hace énfasis en las aptitudes; sin embargo, se practicó un método transmisionista conductista en el que se moldea la conducta del individuo mediante el alcance de objetivos instruccionales.</p>	<p>La Escuela Normal Superior (1936-1951) proporcionó la formación universitaria para los profesores de enseñanza secundaria y universitaria. La inclinación vocacional de los estudiantes en estas décadas continuó orientada hacia las carreras clásicas, como medicina, derecho e ingeniería.</p>	<p>Algunas de las universidades regionales<sup>13</sup> (Antioquia, Cauca, Cartagena, Nariño, Boyacá, Tolima, Caldas, Santander y Valle) se crearon en el siglo XIX y las otras en la década de 1940. La universidad pública impulsó las reformas educativas e intentó darles orientaciones más modernas.</p>

Creación de la Facultad de Ingeniería dentro de la institución universitaria	Enfoque pedagógico predominante	Tarea del maestro en la enseñanza y papel del estudiante en el aprendizaje	Comentario
La <b>Universidad de los Andes</b> fue fundada en 1948, y en ese mismo año se creó la Facultad de Ingeniería.	La Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, en su condición de escuela de formación científica y tecnológica, concentra su actividad en la docencia, la investigación y la consultoría especializada en las áreas fundamentales de la ingeniería moderna. Busca incidir de manera efectiva en el desarrollo económico, social y científico de su entorno, a través de la generación y transmisión del conocimiento en ingeniería, para constituirse en agente principal de sus procesos de cambio científico y tecnológico.	Se pretendía formar profesionales <sup>14</sup> con grandes capacidades académicas y con un capital cultural alto. La formación en ciencias exactas y naturales hace parte de una fundamentación científica para todos los planes de estudio.	Los estudiantes cursaban hasta cuarto semestre en Bogotá y luego continuaban sus estudios en las mejores universidades de Estados Unidos, con el liderazgo de Illinois en urbana. En 1963, la facultad comenzó a ofrecer los programas completos en Colombia y creó los departamentos de Ingeniería Civil, Eléctrica, Industrial y Mecánica.

A mediados del siglo XIX, cuando termina un primer período de industrialización nacional, se presenta un tránsito de la universidad tradicional a la universidad moderna, en el cual no solamente se adquieren conocimientos especializados en las ramas de medicina, derecho, filosofía e ingeniería civil, sino que se amplía el quehacer universitario a la profesionalización en ingenierías específicas, ciencias económicas y administrativas, ciencias sociales y básicas, educación, de acuerdo con los requerimientos del desarrollo, industrialización, urbanización y crecimiento del país. En la segunda mitad de los años sesenta, el desarrollo del país apuntaba a obras de ingeniería eléctrica monumentales<sup>15</sup>, que clamaban mano de obra calificada; los ingenieros civiles eran, hasta entonces, los que dominaban el mercado; el sector eléctrico, incluso, estaba adscrito al Ministerio de Obras Públicas, que sólo se preocupaba por carreteras y puentes; pero de las universidades nacionales y de algunas extranjeras empezaron a egresar profesionales en ingenierías especializadas que reclamaban un espacio en el sistema socioeconómico del país, de manera que la primera batalla de la naciente organización era vencer la oposición de sus congéneres de la disciplina tradicional.

Por otra parte, la universidad abre sus puertas a una clase media que se prepara para insertarse rápidamente en un mercado de trabajo amplio y novedoso en los sectores productivo y de servicios, por lo que se incrementa el número de universidades y se crean nuevas

carreras. Entre 1941 y 1975 se fundan y aprueban oficialmente más universidades (53) que en el resto de la historia del país (Parra y Carvajal, 1978). Ante el prestigio de la mayor rentabilidad<sup>16</sup> de las carreras “modernas”, se inicia un proceso de diferenciación interna: a) formación de tecnólogos, b) formación de técnicos y 3) formación de ingenieros. En el año 1986 el Congreso de la República expidió la Ley 51, que crea el Consejo Profesional de Ingenierías y eleva a la Aciem a la condición de órgano consultivo del Estado. Las decisiones políticas consignadas en esa ley significan el reconocimiento que buscaban hacía décadas los ingenieros especializados<sup>17</sup>.

Sin embargo, el modelo modernizador se agota en el momento en que los profesionales universitarios no pueden ser absorbidos por la estructura de empleo vigente, produciéndose un incremento del desempleo y el subempleo. Por su parte, la excesiva concentración de la matrícula en las instituciones privadas de educación superior genera un sistema educativo masificado y disperso (Jiménez y Figueroa, 1999). En este panorama, el Estado, a través de las reformas de 1958, 1964, 1968 y 1980, intenta organizar un sistema de educación superior coherente, pero no lo logra; por el contrario, la masificación genera una educación más heterogénea, fragmentada, profesionalizante y de baja calidad.

Esta crisis en la calidad de la educación se explicita en la aparición de la universidad de masas, que abre sus puertas a los sectores populares y medios

bajos que presionan por más educación, ofreciéndoles, aquélla, formación técnica, tecnológica y aun universitaria, en diferentes modalidades –presencial y a distancia– y en cómodos horarios –diurnos y nocturnos–. En la sociedad empiezan a convivir estas dos universidades (la moderna y la de masas) y a competir por los mismos puestos de trabajo, ante lo cual surgen la diferenciación y la estratificación, según institución educativa y según especialidad o carrera; el resultado de este proceso se traduce en aumento del desempleo profesional, deterioro de la capacidad salarial de los egresados de las universidades, pobreza intelectual, poca investigación, formación deficiente en contenidos, nula creación de conocimiento y escasez de comunidades académicas.

En la actualidad, la universidad se ha definido como una institución cuyas principales funciones son la docencia, la investigación y la extensión, tres pilares con los cuales está obligada permanentemente a relacionarse con la sociedad y por ello mismo a rendirle cuentas (Acofi, 2008). Por otra parte, la apertura económica de los años noventa trae consigo competencia en todos los campos de la ingeniería; llegan nuevos y grandes actores a los sectores eléctrico, de comunicaciones y de nuevas tecnologías, que inciden en la ingeniería de consulta y de construcción de obras de infraestructura.

De un proyecto piloto para medir las competencias de los ingenieros, nacen los exámenes de calidad de educación superior (Ecaes), que permiten comprobar la calidad de la educación impartida por las universidades y el desempeño académico de los ingenieros, entre otras profesiones. A partir de 2005 se ha procurado dar un giro a los Ecaes hacia la evaluación de competencias, acorde con las últimas tendencias de la educación (Acofi, 2008). Sin embargo, aunque hay un gran bagaje teórico sobre la enseñanza y la evaluación de competencias, no es fácil llevar esta teoría a la práctica (Martínez y otros, 2005).

#### EFFECTOS DE LA HISTORIA EDUCATIVA COLOMBIANA SOBRE LAS PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS ACTUALES EN INGENIERÍA

- En la más tradicional de las posturas –cuyo foco es el saber– se plantea que el dominio del saber disciplinar en ingeniería y la experiencia acumulada, por parte del **profesor**, son suficientes para enseñar bien a los estudiantes y, por ende, generar aprendizajes; así mismo, la docencia de la ingeniería utiliza un saber ya establecido por otros (no usa directamente el saber producido por los investigadores, sino un saber intermediario que se ha reformulado), en tanto que el docente debe manipular para enseñarlo, con el fin de ponerlo en condiciones para que los alumnos lo aprendan, respetando el programa oficial.
- La **enseñanza** de las ciencias naturales e ingeniería se desarrolla mediante rutinas y diagnósticos; según Furió (1994), la enseñanza de las primeras se fundamenta en los textos de referencia y en las creencias del profesorado acerca de la ciencia<sup>18</sup>; sobre algunas de esas creencias, el mismo autor afirma que conducen a visiones ingenuas y deformadas de las ciencias. Por su parte, las guías de laboratorio tipo receta inducen al operativismo, a la falta de comprensión, de representación del problema, de construcción y de negociación de significados de los estudiantes.
- Acerca del **aprendizaje**, Díaz (1999) afirma que los estudiantes, para aprobar la asignatura de su plan de estudios, orientan estrategias hacia el profesor más que hacia el saber que se ha de aprender; algunas de éstas son el estudio de pruebas anteriores, conversaciones con estudiantes que ya han aprobado la asignatura, estilo de preguntas del profesor, libros que consulta para construir pruebas, temas que más le interesan, entre otros aspectos.
- Algunos **currículos** de formación en ingeniería se centran en contenidos<sup>19</sup>, no se han modificado a pesar de los cambios que se han presentado en la educación secundaria colombiana y son profesionalizantes, es decir, pretenden lograr conocimientos especializados desde pregrado. Así mismo, se perciben escasas relaciones entre el conocimiento disciplinar con los problemas sociales y la realidad laboral.
- Las **políticas en educación superior** presentan serias deficiencias de calidad<sup>20</sup>. El anhelo de la estandarización que sigue las huellas de la Declaración Mundial sobre la Educación Superior (París, octubre de 1998), de la Declaración de Bolonia (1999), del programa de Tuning y 6x4 Uealc (Espacio Común de Educación Superior Unión Europea, América Latina y el Caribe), condujo a sistemas de acreditación compatibles con los criterios y estándares internacionales (registro calificado, acreditación de calidad de programas, acreditación de calidad de instituciones, Ecaes<sup>21</sup>, certificación de calidad ISO para servicios

de extensión y laboratorios, acreditación internacional). La universidad ha dejado de ser un centro de pensamiento para convertirse en formadora de mano de obra calificada (Parra y Carvajal, 1978). El afán de diversificación de ofertas curriculares que mimetizan un interés comercial ha llevado a ofrecer más de 25 nominaciones de ingenierías en Colombia, sin contar los ciclos propedéuticos; además, presenta diferenciación y estratificación según institución educativa y programas (Parra, 2003).

Estas manifestaciones son riesgos que malogran una educación superior de calidad, formadora de ciudadanos y sociedades más humanas e incluyentes, pues como lo afirma Morin (1995), representan "... Riesgos de conformar la enseñanza y la investigación a las demandas económicas, técnicas y administrativas del momento, según los métodos y las últimas técnicas del mercado; de reducir la enseñanza a una capacitación, marginando la cultura humanista". En este sentido, la formación de ingenieros no puede ser simplemente una preparación encaminada al conocimiento y desarrollo de una serie de destrezas de tipo instrumental, que permitan acceder a un desempeño laboral, sino que debe orientarse a la formación integral para posibilitar el desarrollo humano".

#### ESTADO ACTUAL DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR EN COLOMBIA

Como lo indica Tamayo (2003), las universidades colombianas atraviesan hoy por un momento difícil, en un período en que se les ha otorgado en alguna medida una autonomía —profundamente limitada a la hora de tomar decisiones financieras y administrativas—. La calidad de la educación superior está cuestionada, debido fundamentalmente a la deficiente preparación del personal docente, el bajo rendimiento de los estudiantes, la gran dispersión de recursos y la escasa dedicación a la investigación<sup>22</sup>.

Algunos obstáculos que impiden conseguir una mejor calidad en la enseñanza son la inestabilidad laboral de los docentes, la pasividad de los cursos, el tiempo que dedican al estudio, las deficiencias que arrastran los alumnos —poca capacidad de síntesis, baja comprensión de textos, inadecuados métodos de estudio, dificultades en la expresión oral y en la expresión escrita, etc.—, las limitadas condiciones de trabajo en lo referente a in-

fraestructura, y la baja dedicación docente para revisar los procedimientos que aplica al enseñar y evaluar. Acerca de este último aspecto, la exposición<sup>23</sup> resulta la elección más coherente en cuanto a la economía del tiempo, ante la "insuficiencia de conocimientos" con que ingresan los alumnos. Sin embargo, en este tipo de práctica la autonomía del alumno es débil, sólo logra dar cumplimiento al programa pero impide estimular la participación del estudiante. Si los contenidos se presentan exclusivamente como verdades concluidas y no se explicitan sus presupuestos, queda oculto el proceso de construcción del conocimiento<sup>24</sup>.

El mejoramiento de la calidad educativa requiere, como condición esencial, que los estudiantes se involucren en el proceso de conocimiento. El ejercicio de la docencia en el primer año de universidad plantea la exigencia de lograr que los alumnos aprendan no sólo las reglas del juego de la institución sino las reglas del trabajo intelectual, lo que sólo es posible a partir de una vinculación afectiva que modifique la relación que los estudiantes han establecido con el conocimiento a lo largo de la escolaridad.

#### ¿CUÁLES SON LOS PRINCIPALES RETOS DE LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA PARA EL DESARROLLO DEL PAÍS?

En la actualidad nadie cuestiona la necesidad de alcanzar una formación técnica, tecnológica y profesional propiciadora del desarrollo de la creatividad, más abierta, más ligada a los problemas y realidades de nuestra sociedad, más dispuesta a la innovación y al cambio, como lo exige el acelerado desarrollo de la ciencia y la tecnología; no obstante, aún es insuficiente la preparación y el compromiso que tienen algunos profesores para que puedan realizar transformaciones en el proceso pedagógico profesional de dichas especialidades.

Se requieren docentes por vocación, con una práctica educativa más acorde con las exigencias de los tiempos, o del período histórico en que viven la comunidad, la sociedad y el país en su conjunto. Hoy se puede afirmar que los educadores transmisores están desfasados históricamente, e incluso también algunos educadores productores de conocimientos, por centrarse en enfoques cuantitativos en sus prácticas investigativas y por no dar la importancia suficiente al desarrollo humano del estudiante en su formación.

Para Palacios (1978), ninguna reforma educativa tiene futuro si no hay maestros en calidad y número suficientes para llevarla a la práctica; al respecto, Piaget (1973) plantea algunos problemas que se deben resolver antes:

- Los maestros no siempre tienen la preparación psicopedagógica<sup>25</sup> que su labor requiere.
- Se desconocen tanto el papel del maestro como sus posibilidades.
- Los maestros tienden a ser un grupo social replegado sobre sí mismo, y casi siempre carente de la valoración social que se merece, de allí los sueldos bajos que se les paga; esto los hace estar alejados de la proyección social, y de la atmósfera del trabajo experimental y de investigación.
- Otro factor que puede obstaculizar la realización del cambio es el hecho de que “cuanto más se trata de perfeccionar la escuela, más dura es la tarea del maestro, y cuanto mejores son los métodos, más difícil su aplicación”; así mismo, “cuanto mejores son los métodos preconizados para la enseñanza, empeora la profesión del maestro, ya que supone a la vez un nivel de élite desde el punto de vista de conocimientos del alumno y de las materias, y una verdadera vocación en el ejercicio de la profesión” (Piaget, 1973).

Los profesores de ingeniería deberían enseñar en contexto (aprendizaje situado), aplicando instrumentos específicos para identificar las potencialidades creativas de los estudiantes, en correspondencia con la especialidad que estudian, así como utilizando problemas profesionales que tengan un carácter heurístico, con el fin de facilitar el proceso de construcción del conocimiento y de desarrollo de la creatividad profesional. Uno de los caminos más adecuados para la estimulación y el desarrollo de la creatividad profesional es la resolución de problemas reales.

#### LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS Y EL APRENDIZAJE SITUADO: ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS ALTERNATIVAS PARA LA FORMACIÓN DE INGENIEROS.

Dado que la aplicación de la resolución de problemas proviene en buena parte de la enseñanza de las ciencias naturales en educación media y básica, que es incipiente

en sus diversos modelos y enfoques en la educación superior en ingeniería, y que su estudio no resulta tan evidente en la enseñanza de la ingeniería, es necesario hacer una aproximación al conocimiento de sus fundamentos teóricos (los principios orientadores), desde las experiencias obtenidas en el ámbito de las ciencias naturales.

Los primeros indicios del Aprendizaje Basado en Problemas (ABP) datan de 1910, fecha a partir de la cual se extiende a todo el mundo, hasta el punto de que se ha convertido en una línea de investigación fértil<sup>26</sup> en los últimos 20 años; hoy se reconocen algunas líneas de investigación sobre enseñanza de las ciencias mediante resolución de problemas, a saber: enseñanza *para* la solución de problemas en ciencias (*Problem solving*) (Ashmore, 1979; Wimbey, 1986), enseñanza *sobre* la solución de problemas en ciencias, enseñanza de las ciencias *centrada en* la resolución de problemas como investigación orientada (Martínez Torregrosa, 1987) y enseñanza de las ciencias *enfocada en* la resolución de problemas en una perspectiva de investigación (N. Marín, 1996).

Desde la didáctica de las ciencias<sup>27</sup> se apunta a una enseñanza que busque más la construcción que la transmisión de conocimiento<sup>28</sup>; también se han estudiado las actitudes hacia las ciencias (Mora, 1993; Escudero, 1985), las habilidades implicadas en la resolución de problemas (Cárdenas, 1998; Mayer, 1983), los sistemas de creencias de los profesores (Erazo, 1999; García, 1987; Pérez, 1987), las concepciones alternativas de los estudiantes (Carrascosa, 1987; Marín, 1994; Caamaño, 1992; Jiménez, 1990, entre otros), la evaluación (Geli, 1986; Tamir, 1998), las relaciones ciencia-técnica-sociedad (Solbes y Vilches, 1992; Colciencias, 1998), el aprendizaje como cambio conceptual, actitudinal, metodológico y axiológico (Gallego, 1999), entre muchos otros aspectos.

Frente a la enseñanza basada en transmisión de conocimientos, la resolución de problemas puede constituir no sólo un contenido educativo, sino sobre todo un enfoque o un modo de concebir las actividades educativas. “La solución de problemas se basa en el planteamiento de situaciones abiertas y sugerentes que exijan de los alumnos una actitud activa y un esfuerzo por buscar sus propias respuestas, su propio conocimiento. La enseñanza basada en resolución de problemas supone fomentar en los alumnos el dominio de procedimientos, así como la utilización de los cono-

cimientos disponibles para dar respuesta a situaciones cambiantes y distintas” (Pozo, 1994, 9). Así, enseñar a los alumnos a resolver problemas supone dotarlos de la capacidad de aprender a aprender, en el sentido de habituarlos a encontrar por sí mismos respuestas a las preguntas que les inquietan o que necesitan contestar, en lugar de esperar una respuesta ya elaborada por otros y transmitida por el profesor o por el libro guía.

Recientes investigaciones didácticas, tanto en el campo de las preconcepciones como en el de los trabajos prácticos, la resolución de problemas, etc., demuestran que “los estudiantes desarrollan mejor su comprensión conceptual y aprenden más acerca de la naturaleza de la ciencia cuando cumplen un papel protagónico en el proceso educativo” (Hodson, 1992).

Actualmente un gran número de instituciones educativas en el mundo investigan sobre el uso de los problemas como estrategia de enseñanza<sup>29</sup>, y recientes propuestas curriculares han hecho suya esta orientación: National Standards for Science Education, 1995; Abet Criteria 2000: an exercise in engineering problem solving; Educación en ingeniería de la Academia de Ingeniería Canadiense, 1999, entre otros.

En Colombia se han venido organizando grupos de investigación en el ámbito de la resolución de problemas en la enseñanza de las ciencias experimentales, particularmente en las universidades de Antioquia, Pedagógica Nacional<sup>30</sup> e Industrial de Santander (UIS).

#### APORTES DE LAS NUEVAS ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS

Con la aplicación de la enseñanza basada en resolución de problemas y el aprendizaje situado es factible formar profesionales competentes en su saber disciplinar, que incorporen en sí mismos una teoría de procesos, valores y capacidad crítica; además, que sepan relacionar lo técnico y lo científico con lo social, cultural y humano. Estos nuevos enfoques trazan caminos de formación que dan la posibilidad de: 1) reconocer al estudiante como ser biológico, social, político y cultural; 2) favorecer la formación integral; 3) promover la autonomía del individuo (en el sentido kantiano de llevarlos a ser adultos); hacer al estudiante independiente y responsable para aprender con capacidad de fijar objetivos y metas, implementar estrategias y evaluar sus progresos; 4) desarrollar en el estudiante competencias individuales<sup>31</sup> y sociales<sup>32</sup> que se manifiestan en contexto, corresponden

a las necesidades de la sociedad del conocimiento y que son para toda la vida –entiéndase por competencias las capacidades y disposiciones de los individuos para la interpretación y la actuación– (Chomsky, 1985); 5) formar ingenieros estratégicos<sup>33</sup> y autorregulados<sup>34</sup>, con pensamiento científico y capacidades para analizar, interpretar y resolver problemas de manera creativa, analítica y crítica; 6) superar los reduccionismos y visiones deformadas de la naturaleza de la ciencia que impregnan la epistemología espontánea del profesorado; 7) facilitar la formación de profesionales que transfieran conocimiento, teoría y métodos desde el campo aprendido hasta nuevos campos o campos afines a su saber disciplinar; 8) transformar en los docentes su propio conocimiento del contenido en representaciones pedagógicas que conecten con los conocimientos previos y disposiciones de sus alumnos; 9) convertir a los docentes en mediadores, constructores y reconstrutores de los saberes de los estudiantes, acercándolos no sólo a los conocimientos elaborados por la humanidad, sino al conocimiento de sus propias habilidades de aprendizaje (metacognición), para que éstos a su vez se transformen de receptores de conocimientos ya elaborados, en permanentes buscadores, indagadores y proponentes de opciones, siempre desde la reflexión del sentido para sí mismos y su entorno, todo lo cual podría resumirse en enseñarles a los estudiantes a aprender; 9) orientar la enseñanza hacia el desarrollo de procesos cognitivos y metacognitivos, que conduzca a los estudiantes a la construcción del conocimiento, al metaaprendizaje y al aprendizaje contextual (Gijsselaers, 1996).

La enseñanza de la ingeniería así pensada se hace con seres humanos y para ellos, y contribuye a alentar cambios sensibles para toda la sociedad; por tanto, trasciende la simple satisfacción económica de algunos individuos, supera los límites del crecimiento físico y la dependencia de los indicadores económicos, para materializar sus efectos sobre todo el conjunto social.

#### CONCLUSIÓN

La sociedad reclama la formación de profesionales críticos, con capacidad proactiva, generadores de soluciones frente a nuevos problemas y retos del desarrollo social y económico, con actitudes y valores acordes con los desafíos de la globalización y el avance de los conocimientos.

Las propuestas de nuevas metodologías de enseñanza contribuyen a fortalecer a la comunidad académica mediante una dinámica de interlocución y de intercambio; además, aportan identidad y sentido a la educación universitaria en Colombia y contribuyen a la búsqueda de políticas educativas adecuadas para la enseñanza de la ingeniería.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abreu Regueiro, Roberto (1993). Fundamentación teórica de la investigación "Modelo Teórico Básico de la Pedagogía Profesional Cubana". La Habana: Ispetp.
- [2] *Anales de la Universidad Nacional* (1968). "Qué es la Universidad Nacional", tomo I, Bogotá, p. 6.
- [3] Arciniegas, Germán (1935). "La república universitaria". *Educación*, Vol. 3, Nos. 18-19.
- [4] Acofi (2008). El profesor de ingeniería. Profesional de la formación de ingenieros. Foros académicos XXVI Reunión Nacional de Facultades de Ingeniería, VI Encuentro Iberoamericano de Instituciones de Enseñanza de la Ingeniería, Colombia.
- [5] Ardila, Rubén (1982). *Psicología del aprendizaje*. México, D.F.: Editorial Siglo XXI.
- [6] Bateman y otros (1975). *Apuntes para la historia de la ciencia en Colombia*. Bogotá: Colciencias.
- [7] Bruner, Jerome (1985). *En busca de la mente*. México: Fondo de Cultura Económica.
- [8] Busquets, María D. y otros (1986). *La pedagogía operatoria: un enfoque constructivista de la educación*. Barcelona: Editorial LAIA.
- [9] Chomsky, N. (1985). *Reflexiones sobre el lenguaje*. Barcelona: Planeta.
- [10] Díaz, Mario y otros (1986). El modelo pedagógico integrado. *Educación y Cultura*, No. 7. Bogotá: CEID-Fecode.
- [11] Dollero, Adolfo (1930). *Cultura colombiana*. Bogotá: Editorial Cromos, p. 114.
- [12] Flórez Ochoa, Rafael (1999). *Evaluación pedagógica y cognición*. Bogotá: Editorial McGraw Hill.
- [13] Garrett, M. R. (1988). Resolución de problemas y creatividad: implicaciones para el currículo de ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 6(3), pp. 224-230.
- [14] Gijsselaers, W. (1996). Connecting problem-based practices with educational theory. LuAnn Wilkerson & Win H. Grijsselaers (eds.). *Bringing problem-based learning to higher education: theory and practice*. San Francisco, California: Jossey-Bass Publisher.
- [15] Gil Pérez, D., Martínez Torregrosa, J. & Senent Pérez, F. (1988). El fracaso en la resolución de problemas de física: una investigación orientada por nuevos supuestos. *Enseñanza de las Ciencias*, 6(2), pp. 131-146.
- [16] Hodson, D. (1992). In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International Journal of Science Education*, 14(5), pp. 541-566.
- [17] Jiménez Becerra, Absalón & Figueroa, Helwar Hernando (1999). Políticas educativas en la educación superior, 1952-1992. *Revista Colombiana de Educación*, Nos. 38-39. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- [18] Lacasa, P. & Herranz, P. (1995). *Aprendiendo a aprender: resolver problemas entre iguales*. Madrid: MEC (Cide).
- [19] Le Goff, Jacques (1990). *Los intelectuales en la edad media*. Barcelona: Editorial Gedisa.
- [20] Marín, N. (1996). Condiciones fundamentadas de enseñanza-aprendizaje para la resolución de problemas en ciencias. Conferencia. Programa Interinstitucional de Doctorado en Educación. Bogotá: UPN.
- [21] Martínez B., Alberto (1984). *Dos estudios sobre educación en la Colonia*. Bogotá: UPN-CIUP.
- [22] Martínez, Joaquín y otros (2005). *Desarrollo de competencias en ciencia e ingenierías. Hacia una enseñanza problematizada*. Bogotá: Cooperativa Editorial Magisterio.
- [23] Martínez Torregrosa, J. (1987). La resolución de problemas como investigación: un instrumento de cambio metodológico. Tesis doctoral, Universidad de Valencia.
- [24] Mockus, Antanas (1984). Movimiento pedagógico y defensa de la calidad de la educación pública. *Educación y Cultura*, No. 2. Bogotá: CEID-Fecode.
- [25] Molina, Gerardo (1938). El presidente López y la universidad. *Acción Liberal*, Vol. 57, Bogotá.
- [26] Morin, E. (1990). *Introduction a la pensée complexe*. París: ESF Editeur (traducción al castellano: *Introducción al pensamiento complejo*. Barcelona: Gedisa, 1995).
- [27] Newman, D., Griffin, P. & Cole, M. (1991). La zona de construcción del conocimiento. Madrid: MEC-Morata.
- [28] Ortiz Ocaña, Alexander (2002). Exigencias didácticas para la educación y el desarrollo de la creatividad profesional. En <http://www.monografias.com>; "Creatividad profesional", en <http://www.monografias.com>; "La pedagogía profesional: principales relaciones en el proceso pedagógico", en <http://www.monografias.com>; "La educación y el desarrollo de la creatividad profesional: un reto en la formación de profesionales técnicos", en <http://www.monografias.com>; "Profesionalización vs. academicismo en la formación pedagógica profesional", en <http://www.monografias.com>; "Condiciones psicopedagógicas para la utilización de los métodos problémicos en el proceso pedagógico profesional", en <http://www.monografias.com>. 2002.
- [29] Ortiz Ocaña, Alexander (1997). La activación del proceso pedagógico profesional: un imperativo de la pedagogía contemporánea en la educación técnica y profesional. Tesis de maestría. La Habana: Ispetp Héctor Alfredo Pineda Zaldivar.
- [30] Ortiz Ocaña, Alexander (2002). Metodología para la enseñanza problémica de la contabilidad en la educación técnica y profesional. Tesis de doctorado. ISP José de la Luz y Caballero-Holguín.
- [31] Parra S., Rodrigo (2003). *La calidad de la educación. Universidad y cultura popular*. Bogotá: Fundación FES-Tercer Mundo Editores, pp. 265-266.
- [32] Parra S., Rodrigo & Carvajal, María E. (1978). La universidad colombiana: de la filosofía a la tecnocracia estratificada (ponencia presentada en el seminario Clacso-Cede: "Situación actual de las universidades en América Latina"). Bogotá, 26 al 29 de septiembre.
- [33] Palacios, Jesús (1978). *La cuestión escolar: críticas y alternativas*. Barcelona: editorial LAIA.
- [34] Pestalozzi, Juan Enrique (1927). *El canto del cisne*. Madrid: Ediciones de la Lectura.
- [35] Piaget, Jean (1973). *Psicología y pedagogía*. Barcelona: Editorial Ariel.
- [36] Pozo, J. Ignacio (1985). *Aprendizaje de la ciencia y pensamiento causal*. Barcelona: Editorial Gedisa.
- [37] Pozo, J. Ignacio (1994). *La solución de problemas*. Madrid: Aula XXI, Santillana.

- [38] Tudesco, J. C. y otros (1983). *El proyecto educativo autoritario*. Buenos Aires: Flacso, cap. IV.
- [39] Poveda Ramos, Gabriel. *Historia social de la ciencia en Colombia*, tomo IV.
- [40] Rogoff, B. (1993). *Aprendices del pensamiento. El desarrollo cognitivo en el contexto social*. Barcelona: Paidós.
- [41] Torres S., Jaime & Salazar, Luz A. (2002). *Introducción a la historia de la ingeniería y de la educación en Colombia*, 1 ed. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, abril, p. 150.
- [42] Smith, M.U. (1991). *Toward and unified theory of problem solving: views from the content domains*. Hillsdale: Erlbaum.
- [43] Tamayo Valencia, Alfonso (2003). *La investigación en educación y pedagogía en Colombia*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- [44] Torres Sánchez, Jaime & Salazar Hurtado, Luz Amanda (2002). *Introducción a la historia de la ingeniería y de la educación en Colombia*, 1a. ed. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, abril, p. 53.
- [46] Safford, Frank (1976). *The idea of the practical*. Austin: University of Texas Press.
- [47] Vygotsky, L. (1988). *El desarrollo de los procesos psicológicos superiores*, cap. 6: Interacción entre aprendizaje y desarrollo. México: Editorial Grijalbo.
- [48] Zilberstein Toruncha, José, Portela, R. & MacPherson, M. (1999). *Didáctica integradora de las ciencias, experiencia cubana*. La Habana: Editorial Academia.

## REFERENCIAS

- Este modelo educativo se construyó para una sociedad que prioriza los valores de la competitividad, el individualismo y la autonomía; se sustenta en saberes atomizados en áreas del conocimiento y de los cuales depende la innovación (concepción tecnológica del currículo). Según este modelo, el diseño curricular lo debe desarrollar un grupo exclusivo de profesores (tendencia tecnicista) con racionalidad técnica (tendencia empírico-positivista que privilegia el carácter instrumental y técnico frente al crítico-analítico).
- Las universidades del mundo occidental surgen con las ciudades y la urbanización de la sociedad medieval; como lo indica Jacques Le Goff en su obra *Los intelectuales en la edad media* (1990), en los siglos XII y XIII aparecen los "gremios universitarios" que se perfilan como tales y adquirieron vida propia; la función docente fue de carácter religioso e impidió la autonomía; las tareas docentes estuvieron profundamente ligadas a los preceptos eclesiásticos que desde un comienzo orientaron los diseños de las corporaciones universitarias.
- José Celestino Mutis fue un médico y naturalista que regentó las cátedras de medicina y matemáticas en el Colegio del Rosario desde 1762; llegó un año antes al reino de Granada como integrante del equipo del virrey Pedro Messía de la Zerma y se estableció desde 1775 para impulsar la metalurgia, el trabajo científico y la explotación del oro en el valle del Alto Magdalena, en los sitios mineros sobre el río Coello de Santa Ana y Real del Sapó, y en Montuna y Veta en Pamplona. Mutis recorrió el virreinato con el objetivo de coleccionar plantas, insectos y minerales desde la costa atlántica, el río Magdalena, el río Opón y la sabana de Bogotá. Sus descripciones sobre la quina que descubrió entre 1772 y 1773 en Tena (Cundinamarca), y entre Honda y Santafé, fueron publicadas en *El arcano de la quina*, que se reconoce actualmente como una de las obras más completas en el campo de la botánica. Mutis fue maestro de Francisco José de Caldas, José Félix de Restrepo, Eloy Valenzuela, Manuel Facundo y Sinforoso Mutis, José María Carbonell, José I. Triana, José María y Francisco Javier Matiz.
- La Expedición Botánica la creó y dirigió, en sus primeros años, José Celestino Mutis; inició labores en abril de 1783 en la hacienda de Mesitas del Colegio y se dedicó al conocimiento de la naturaleza, riqueza y posibilidades económicas del país.
- En ellos estudiarían arquitectura militar, hidráulica y civil, fundición y construcción de acueductos, molinos, canales, destinados a la explotación de minas, fortificaciones, artillería, geografía, cartografía, principios de la táctica y otras asignaturas. En cuanto a los métodos de enseñanza, Gerardo Molina señala que ellos debían forjar un tipo de hombre que se ajustase a la sociedad cambiante y que ayudase a su transformación (Molina, 1938, 23). El último tratado estaba dedicado a la ingeniería y la arquitectura civil, que se encarga del levantamiento de templos, palacios, puentes, calzadas, caminos y otros.
- Este modelo ha dominado la mayor parte de las instituciones educativas a lo largo de la historia, no ha contado con defensores teóricos, aunque se cuentan por millares sus defensores de hecho. Ha sido ampliamente utilizado en la preparación de jóvenes, en los avances científicos y tecnológicos, en el desarrollo de currículos de carácter científico donde el alumno recibe clases magistrales y desarrolla actividades de laboratorio orientadas por el profesor.
- Es común que en este modelo la evaluación de los estudiantes sea un procedimiento utilizado en la parte final o solamente al término de las unidades o secciones del programa, con el objeto de establecer la cantidad de contenidos memorizados y decidir la promoción o repetencia del curso.
- En 1961 se creó el Departamento de Ingeniería Eléctrica, en 1964 el Departamento de Ingeniería Mecánica y en 1965 se incorporó el Departamento de Ingeniería Química, como culminación del proceso de integración académica y administrativa que se realizaba en la universidad. En 1969 se creó el Departamento de Ingeniería Agrícola y en 1978 el Departamento de Ingeniería de Sistemas.
- Con los primeros intentos exitosos de la economía nacional por vincularse al mercado internacional como país exportador de materia prima, aparecen en la universidad otras disciplinas en ingeniería.
- La segunda guerra mundial interrumpió la llegada de materias primas a Colombia, país que no tenía una industria química fuerte.
- Se promovió la diversificación de las carreras (Química, Industrial, Metalúrgica, Eléctrica, Electrónica, Mecánica y Sanitaria). Otras carreras de ingeniería se crearon después: en 1996, la Ingeniería de Materiales; en el 2001, la de Bioingeniería; y en el 2002, Ingeniería de Telecomunicaciones.
- Llegaron al país Carlos S. de Greiff y Pedro Nisser (suecos); Tyrell Moore, William Cock, Eduardo Walter, Robert Stephenson y Alejandro Jonson (ingleses), Carlos Degenhardt y Enrique Haeusler (alemanes); y trajeron adelantos tecnológicos de importancia para la minería y la ingeniería civil.
- Estas zonas comienzan a caracterizarse por el desarrollo industrial, portuario y comercial: café, azúcar, petróleo, etc. Algunas responden a las políticas de sustitución de importaciones; otras, al propósito de crear sentimientos de regionalismo para superar la hegemonía del centro del país.
- El propósito era educar a la nueva dirigencia del país e ingenieros –que terminaban sus estudios en las universidades de Illinois, Texas y Pittsburg– capaces de liderar procesos de modernización tecnológica en el país.
- En el gobierno del presidente Carlos Lleras Restrepo se creó la

empresa ISA con la misión de generar y transportar electricidad para todo el país.

16. En la base de este proceso se encuentran las teorías economicistas del capital humano y de los recursos humanos, que sostienen una relación entre la educación y la sociedad a través del desarrollo económico; se supone que a mayor educación, mayor capacidad productiva de los individuos y, por consiguiente, mayor nivel de ingresos.

17. Hasta entonces, los ingenieros civiles eran expertos en electrónica, electricidad, metalúrgica, cueros, agro... En el país no había espacio para la ingeniería especializada ni mucho menos para la opinión respetable de quienes la practicaran.

18. Dada la circulación de la concepción de conocimiento científico como un saber objetivo, se ha sostenido que el profesor debe ser algo así como un instrumento neutral para la transmisión de los conocimientos o contenidos elaborados por la comunidad de expertos.

19. Actualización y modernización curricular en ingeniería eléctrica y electrónica. Bogotá: Acofi - Icfes, 9 de marzo de 1996.

20. Se entiende por calidad aquella capacidad que tiene la educación de posibilitar el desarrollo humano: creando y recreando el conocimiento en diferentes contextos culturales; aplicando ese conocimiento a la realidad social, participando como ciudadano y promoviendo la equidad social.

21. En el año 2003 se evaluaron 57.541 estudiantes y 1.360 egresados de 27 programas; en el año 2004, 82.878 estudiantes y 2.654 egresados de 43 programas; en el año 2005, 83.059 estudiantes y 5.386 egresados de 50 programas.

22. En la investigación se observa una tendencia empírico-positivista que privilegia el carácter instrumental y técnico frente al crítico analítico.

23. Una educación basada en abstracciones y sutilezas lógicas puede apartar al alumno de toda realidad, incapacitándolo para enfrentarse con las exigencias de sus problemas profesionales. La enseñanza debe perder el carácter estático, para pasar a una enseñanza dinámica, con menos conocimientos terminados y más ideas en embrión, bien firmes, para que el alumno las desarrolle más tarde en la dirección que las necesidades le aconsejen.

24. El aprendizaje supone no sólo la aprehensión del saber sino también del "saber hacer".

25. Todavía es insuficiente la preparación que tienen algunos docentes para que puedan realizar transformaciones con el fin de lograr una educación técnica y profesional propiciadora del desarrollo de la creatividad profesional en los estudiantes.

26. Como ilustración de los diversos enfoques de investigación en este campo cabe destacar algunos de los interrogantes frecuentemente planteados: ¿por qué es importante la resolución de problemas? ¿Qué es resolver problemas? (R.M. Garrett, 1988). ¿Qué significa el término problema dentro del marco de la enseñanza de las ciencias? ¿Existen diferentes tipos de problemas? ¿Qué tipos de problemas se pueden plantear en la enseñanza de las ciencias? (A.F. Sigüenza y M.J. Sáez, 1990). ¿Problemas aislados o clases de problemas? (M.L. Callejo, 1990). ¿Por qué resulta tan compleja la enseñanza para resolver problemas? ¿Cómo diseñar una educación orientada a aumentar la capacidad para resolver problemas? ¿Cómo evaluar dicha

capacidad? ¿Basta que el profesor elabore un amplio listado de problemas para que el estudiante aprenda a solucionar otros? ¿Hasta dónde el problema de enseñar a resolver problemas se convierte en un problema de aprendizaje? ¿El aprendizaje de la resolución de problemas guarda relación con el problema de transferencia de conocimiento a contextos cotidianos? Si se tiene en cuenta que en la enseñanza de conceptos se indaga acerca de las ideas previas o concepciones o esquemas alternativos del alumno, ¿qué se debería indagar para el caso de la resolución de problemas? Durante los procesos de resolución, ¿utilizan los alumnos, todos sus conocimientos sobre los conceptos y procedimientos involucrados en los problemas que resuelven? ¿Controlan sus procesos de pensamiento eligiendo los enfoques más adecuados y verificando tanto el proceso como la solución final? (Cobo, 1996). ¿Son iguales todos los procesos de resolución de problemas? ¿Hay diferentes tipos de resolutivos? ¿Los problemas son fijos e independientes del resolutivo? ¿Qué diferencia un buen resolutivo de otro mediocre? (Gil y otros, 1988).

27. Diversos investigadores en didáctica de las ciencias han realizado estudios y tesis doctorales en el tema de resolución de problemas: Dewey (1975), Osborne y Wittrok (1985), Driver y Holdham (1986), Garrett (1988), Duschl (1990 y 1995), Burbules y Linn (1991), Hodson (1992), Bencze y Hodson (1999), Furió y Guisasaola (1998), Zoller (1999), Gil, Carrascosa *et al.* (1999).

28. Martínez Torregrosa (1987), Ramírez (1990), Reyes (1991), Varela (1994) han realizado sus tesis doctorales en el ámbito de la enseñanza de la física y la química promoviendo la construcción del conocimiento en el estudiante.

29. La Facultad de Medicina de la Universidad McMaster, en Ontario, el Centro de Investigación sobre la Enseñanza y el Aprendizaje de la Universidad de Aalborg en Dinamarca, la Universidad de Valencia en España y el Instituto Politécnico de Worcester, en Canadá, se han convertido en instituciones líderes en el uso de los problemas y proyectos como estrategia de enseñanza.

30. Grupo Probeduciencias, en su línea de investigación "Resolución de problemas y enseñanza de las ciencias naturales y las ingenierías".

31. Competencias comunicativas y argumentativas, habilidades de negociación, de toma de decisiones y de justificación de lo que piensan.

32. Trabajo en equipo.

33. Se refiere a estar "orientado" en el campo de estudio, con conocimiento de cómo enfrentarse metodológica y actitudinalmente a situaciones problemáticas abiertas.

34. Con capacidad de decidir lo que saben y lo que no saben. Diversos autores (Lacasa y Herranz, 1995; Rogoff, 1993; Newman, Griffin y Cole, 1991; etc.) han señalado la relación entre los procesos de resolución de problemas, la formación de conceptos científicos, y el desarrollo de la capacidad de autorregulación de los propios procesos de aprendizaje, capacitación vinculada al concepto de aprender a aprender. El estudiante aprende a aprender cuando es capaz de controlar el proceso de aprendizaje, lo que implica una reflexión sobre sus propios procesos y contenidos de conocimiento. Según Smith (1991), la propia dinámica interna de esta estrategia fomenta el aprendizaje autorregulado.