

# REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERIA

Año 17 N° 68

Octubre - Diciembre de 2007

ISSN 0121-5132

Calificación de conexiones para pórticos de lámina delgada

Origen, características y tratamiento de los residuos producidos en una planta de purificación de agua (PPA)

El ensayo Micro Deval. Sus características y ámbitos de aplicación

The study of friction in joints

La computación grid y su aplicación en sistemas que descubren conocimiento

Perspectivas sociológica y económica en la teoría organizacional (1a. Parte)

Búsqueda tabú para el 2-agente viajero peripatético

Configuración logística para tratamiento de residuos hospitalarios peligrosos



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

TARIFA POSTAL REDUCIDA N° 2007-107  
SERVICIOS POSTALES NACIONALES S.A.  
VENCE 31 DE DICIEMBRE DE 2007



ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

Director de la Oficina de Desarrollo Institucional de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y director científico de la Revista.

## Una visión de la universidad del futuro

Varias tendencias de cambio tecnológico y económico demarcan la trayectoria para la transformación de la universidad del futuro.

La reestructuración de la economía y la aparición de las estrategias de globalización generaron una reorientación en los factores de acumulación de la riqueza, la tecnología y el conocimiento se convirtieron en factores prioritarios durante las dos últimas décadas del siglo XX y provocaron transformaciones en la sociedad y en las instituciones.

El nuevo modelo generó cuatro líneas generales de desarrollo:

Las reformas del capitalismo: de la concepción keynesiana a un capitalismo orientado por el mercado, en el que la productividad y competitividad se fundamentan en la creación de conocimiento.

La globalización: que orienta la nueva economía sobre la reestructuración del comercio y la producción.

El posicionamiento y la potenciación de la investigación: mediante el desarrollo de redes y sistemas interactivos como fuentes de manejo de información, innovación y estrategias de acción en el desarrollo organizacional, que determinan una reorganización de las instituciones educativas.

La autoevaluación institucional permanente: para seguir y perfeccionar la gerencia del conocimiento y el desempeño de la universidad para fortalecer su autonomía y responsabilidad social.

Por estos cambios, la educación superior y las universidades se deben valorar desde una perspectiva estratégica, en particular por su vinculación a la producción de nuevo conocimiento en la ciencia y la tecnología, debido

a los desarrollos recientes del comercio internacional, la inversión y las transferencias de conocimiento.

El nuevo escenario para las universidades, en el contexto emergente de la sociedad, es transformarse en instituciones autogeneradoras de conocimiento, lo cual constituye su razón de ser, su identidad y su misión, definidas por el valor social de los conocimientos que producen y difunden. Esta concepción de la universidad debe corresponder con la ética y el deber social que la orientan como entidad autónoma requerida por la sociedad del conocimiento.

Para que la educación del futuro se centre en el aprendizaje y la gestión de conocimiento, es necesario rediseñar, adaptar y desarrollar las instituciones, y las actitudes y prácticas en la comunidad universitaria.

El nuevo modelo de aprendizaje –la formación de las personas– es una tarea permanente a lo largo de la vida. Esta responsabilidad compromete más al educando, que debe desarrollar juicio crítico, creatividad, iniciativa; mostrar altos niveles de conocimiento (saberes), habilidades, competencias y destrezas, de acuerdo con un desarrollo ético para el crecimiento social sustentable.

En consecuencia, la transformación de la universidad constituye un proceso de reforma y cambios a largo plazo, definidos a partir de un proceso participativo y reflexivo de la comunidad universitaria para formar los profesionales capaces de crear, innovar y contribuir al desarrollo de la sociedad.

En esta visión del futuro, la universidad debe introducir cambios en su misión para potenciar su contribución a través de la gestión del conocimiento de docencia-investigación en la producción del conocimiento y la difusión con relación a las necesidades, los problemas y las prioridades de la sociedad.



# Calificación de conexiones para pórticos de lámina delgada (2da. parte)

GABRIEL VALENCIA CLEMENT

Ingeniero civil, profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia.

SERGIO VILLAR SALINAS

Ingeniero civil, estudiante de maestría en estructuras, Universidad Nacional de Colombia.

Artículo recibido: 27/11/2007  
Evaluación par interno: 15/01/2008  
Aprobado: 13/03/2008

## Resumen

El presente artículo describe los aspectos más sobresalientes de la segunda parte de un programa de calificación de conexiones para pórticos de lámina delgada que se está adelantando en la Universidad Nacional de Colombia. En esta segunda parte se determina el comportamiento sísmico de dos tipos de conexiones, a saber, conexiones con chapas laterales y conexiones con placas de continuidad prolongadas. La calificación contempla la modelación teórica de los modelos reales por el método de los elementos finitos, la realización de ensayos experimentales (cíclicos y monotónicos), el análisis y comparación de resultados teóricos y prácticos, la obtención de curvas de histéresis de las conexiones, el cálculo aproximado del coeficiente de disipación de energía  $R$  para estructuras que dispongan de las conexiones en estudio, y la orientación de los resultados hacia recomendaciones de diseño para cuando se use el tipo de conexiones mencionadas.

**Palabras clave:** calificación de conexiones, ensayos cíclicos y monotónicos, protocolo de carga.

## Abstract

This paper describes the most important aspects of the second part of a cold formed steel member connections research that is currently being done at the Universidad Nacional de Colombia. In this second stage the behaviour of two different connections are studied, that is, extended continuity plates connection and side plates connection. This study looks at the results of a finite element analysis of the models, experimental testing on models (cyclic and monotonic tests), analysis and comparison between theoretical and experimental results, hysteretic curves of the connections, approximate calculation of energy dissipation coefficient for structures that use the types of connections studied, and finally, the application of whole results to cold formed steel frames design when these connections are used.

**Keywords:** Qualification of connections, Cyclic and monotonic tests, Load Protocol.

## INTRODUCCIÓN

El término calificación de conexiones metálicas para pórticos está ligado a la ocurrencia de los sismos de Northridge, Estados Unidos (1994) y Kobe, Japón (1995), puesto que estos eventos pusieron al descubierto fallas conceptuales de diseño, falta de calidad en las soldaduras aplicadas y ciertas respuestas inadecuadas de las conexiones usadas en estructuras de acero ante solicitaciones sísmicas, entre otros aspectos. Por tanto, se ha venido estudiando con especial cuidado el comportamiento sísmico de las conexiones.

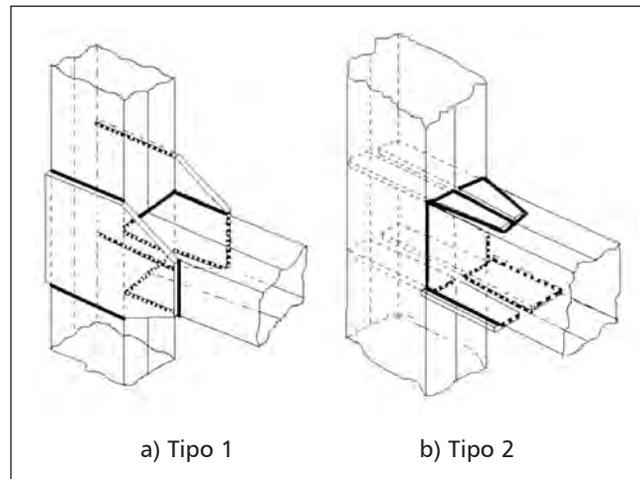
Para conexiones de perfiles metálicos formados en caliente (o laminados o de acería), cuyo comportamiento es muy diferente al de los formados en frío (o de lámina delgada), se han realizado considerables estudios; sin embargo, para el caso de las segundas, es poco lo que se conoce en comparación con las primeras. En general, el alcance de las normas de diseño de perfiles de lámina delgada es limitado en muchos aspectos sísmicos, como el coeficiente de disipación de energía  $R$ , entre otros.

Aunado a lo anterior, el hecho de que las estructuras armadas con perfiles de lámina delgada permiten una gran reducción de peso propio en comparación con otros tipos de estructuras constituyó una buena *justificación* para llevar a cabo la investigación cuyo resumen se presenta en este artículo [10].

El programa de calificación de conexiones más extenso en Estados Unidos fue el que realizó la Agencia Federal de Administración de Emergencias (FEMA), cuyos resultados se publicaron en 2000, y se denominó FEMA 350 [5]. Aunque se realizó para el caso de perfiles de acería, sirvió de referencia para la presente investigación, además de otros documentos que en principio también fueron propuestos para conexiones de perfiles laminados, entre ellos ATC 24 [3] y AISC 2005 [1].

Con respecto al caso de conexiones para pórticos de lámina delgada, se consideran *antecedentes* la experiencia australiana obtenida por Hancock et al (2006) [7]; en Colombia, las obtenidas por Gallo et al (2004) [6] y López-Valencia (2005) [9]. Esta última, en adelante, se denominará investigación antecesora (1ª parte).

Basándose en lo anterior, la presente investigación tuvo como *objetivo general* “determinar el comportamiento sísmico de dos tipos de conexiones para pórticos de



**Figura 1.** Esquema de conexiones estudiadas en la presente investigación

lámina delgada, a saber, conexión con chapas laterales (tipo 1) y conexión con placas de continuidad prolongadas (tipo 2)” (figura 1), contemplando los siguientes pasos para lograrlo: modelación teórica de los modelos reales por el método de los elementos finitos (MEF), realización de ensayos experimentales (monotónicos y cíclicos), análisis y comparación de resultados teóricos y prácticos, obtención de curvas de histéresis de las conexiones, cálculo aproximado del coeficiente de disipación de energía para estructuras que dispongan de las conexiones en estudio, y orientación de los resultados hacia recomendaciones de diseño para cuando se use el tipo de conexiones mencionadas.

Los ensayos fueron realizados en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, donde se recibió una excelente colaboración por parte de los ingenieros y laboratoristas. Hay que destacar que sin esa cooperación, no habría sido posible obtener los resultados que aquí se presentan.

## MARCO TEÓRICO

Como marco teórico de la presente investigación se consideraron los siguientes conceptos:

- Los utilizados en la investigación antecesora, como límites de la relación ancho-espesor, propuestos por las especificaciones AISI [2] y la influencia del formado en frío en las propiedades del acero, entre otros.
- Resistencia a la flexión y al pandeo lateral de perfiles de lámina delgada [2 y 11], jerarquía de plastificación

en pórticos [1 y 5] y criterio de falla de materiales dúctiles según Von Mises, entre otros.

**Tabla 1**  
Resumen de modelos reales

Tipo de ensayos	Nombre del modelo	Columna (Cajón) Perfil (PHR-C)	Viga (Cajón) Perfil (PHR-C)	Conexión
(1)	(2)	(3)	(4)	
Monotónicos	T1 - 1	305x80x2.5	305x80x2.0	Tipo 1
	T1 - 2	220x80x3.0	220x80x2.5	Tipo 1
	T2 - 1	305x80x2.5	305x80x2.0	Tipo 2
	T2 - 2	220x80x3.0	220x80x2.5	Tipo 2
Cíclicos	T2 - 3	305x80x2.5	305x80x2.0	Tipo 2
	T2 - 4	305x80x2.5	305x80x2.0	Tipo 2
	T2 - 5	220x80x3.0	220x80x2.5	Tipo 2
	T2 - 6	220x80x3.0	220x80x2.5	Tipo 2
	T1 - 3	305x80x2.5	305x80x2.0	Tipo 1
	T1 - 4	305x80x2.5	305x80x2.0	Tipo 1
	T1 - 5	220x80x3.0	220x80x2.5	Tipo 1
	T1 - 6	220x80x3.0	220x80x2.5	Tipo 1

1

2.1 Modelos teórico-matemáticos

Uno de los puntos más importantes del marco teórico es la modelación por el MEF. Mediante esta, con la ayuda de los softwares ANSYS v10.0 y SAP 2000 v9.03, se estimaron las deflexiones en el punto de aplicación de la carga, asociadas a la fluencia de las fibras extremas de las vigas (figura 2) y los esfuerzos en la zona de conexión para cada modelo (tabla 1) para ajustar algunos parámetros de los ensayos experimentales, como el protocolo de aplicación de las cargas de ensayo, entre otros.

Para los modelos teóricos se realizaron dos tipos de análisis: elástico e inelástico, y se consideraron todas las propiedades de geometría y material de los modelos reales. Los resultados de la modelación se exponen más adelante (en la sección Calibración del modelo teórico).

MARCO EXPERIMENTAL

Para fijar los parámetros de los ensayos experimentales, se siguieron las recomendaciones de la investigación anterior, y de FEMA 350, AISC 2005 y ATC 24, entre otras.

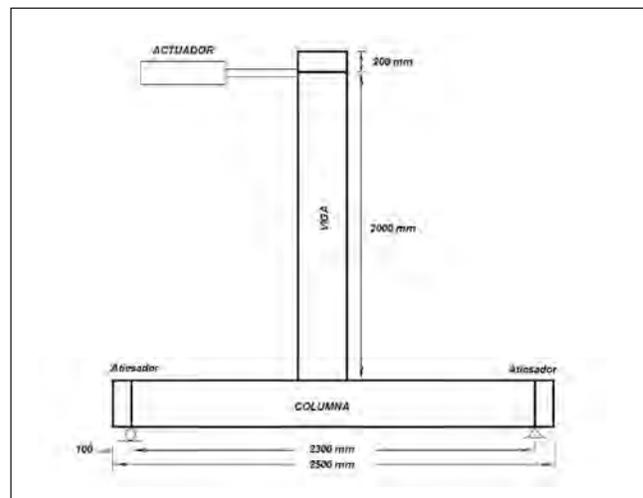


Figura 2. Esquema de los modelos reales

Cabe anotar que, para la definición de los modelos, se consideraron dos aspectos: que las conexiones estudiadas fueran lo más viable posible desde el punto de vista constructivo y que, en lo posible, los resultados se pudieran comparar con los obtenidos en la investigación anterior [9]. Los perfiles (tabla 1) y el tipo de sección de los elementos utilizados (cajón) se eligieron de modo que tuvieran relaciones ancho-espesor y factores de reducción por esbeltez Q, parecidos a los del trabajo mencionado.

Se determinaron la resistencia a la flexión (basada en la iniciación de la fluencia  $\phi M_y$  y en la reserva inelástica  $\phi M_p$ ) y al pandeo lateral de los elementos, esta última, para garantizar que los elementos tipo viga no fallen por pandeo flexotorsional. Así mismo, se revisó el cumplimiento de la jerarquía de plastificación viga-columna para garantizar que cuando las vigas alcancen su máxima resistencia, las columnas se comporten elásticamente, lo cual permite centrar el estudio en el comportamiento sísmico de la conexión.

Se calcularon las platinas y las soldaduras que componen las conexiones, bajo la premisa de que, al igual que las columnas, permanezcan en rango elástico para las solicitaciones que liberan las vigas cuando alcanzan su máxima resistencia probable. Se aplicó la teoría propuesta por AISI y por FEMA 350.

El protocolo de carga para los ensayos fue uno de los parámetros de mayor cuidado en el estudio realizado, habida cuenta que tanto la velocidad de carga como el procedimiento de aplicación de la carga cíclica inciden en cierta medida en la respuesta de la estructura. Por

tanto, para la definición del protocolo de carga cíclica se tomaron como base los resultados de los ensayos monotónicos.

El protocolo de carga para los ensayos monotónicos se definió con base en la tasa de aplicación de la carga, la que se tomó igual a 0,1 mm/s con el fin de cuidar que el incremento de esfuerzos inducidos en las aletas de las vigas se encontrara en un rango de (6-30) MPa/s, según abstracción de la norma NTC 2 [8].

El protocolo de carga cíclica se definió con 12 etapas de carga, cada una de ellas con ciclos a diferentes amplitudes de desplazamientos (tabla 2).

En los ensayos, las variables se controlaron mediante un sistema de recolección automática de datos y un actuador dinámico de control numérico para la aplicación de cargas.

En los ensayos, las variables se controlaron mediante un sistema de recolección automática de datos y un actuador dinámico de control numérico para la aplicación de cargas. Los servicios de laboratorio para los ensayos fueron ofrecidos por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

**RESULTADOS**

**Curva esfuerzo-deformación del material**

La curva esfuerzo deformación promedio del material de los modelos realizados para la presente investigación se determinó a partir de cuatro ensayos de tensión de probetas extraídas de los mismos perfiles que conformaron las vigas. De dicha curva se obtuvo  $F_y = 446$  MPa,  $F_u = 522$  MPa y  $E = 200758$  MPa.

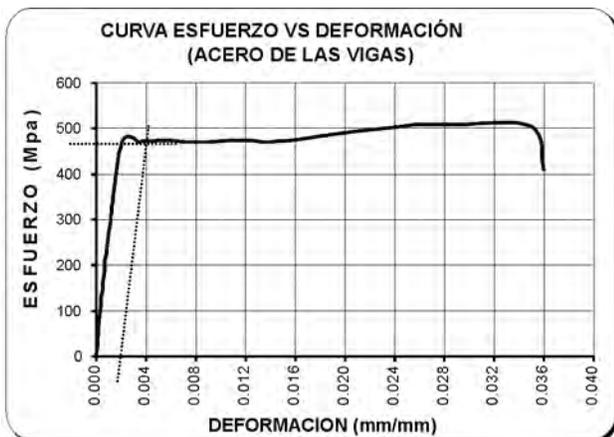


Figura 3. Curva esfuerzo-deformación.

**Tabla 2**  
Protocolo de cargas cíclicas

Paso de carga	Nº de ciclos	$\delta$
1	6	0,25 $\delta_y$
2	6	0,50 $\delta_y$
3	6	0,75 $\delta_y$
4	4	1,0 $\delta_y$
5	4	1,25 $\delta_y$
6	4	1,50 $\delta_y$
7	2	1,75 $\delta_y$
8	2	2,0 $\delta_y$
9	2	2,25 $\delta_y$
10	2	2,50 $\delta_y$
11	2	2,75 $\delta_y$
12	2	3,0 $\delta_y$

**Curvas momento-rotación**

Las curvas que se observan en las figuras 4 a 15 fueron trazadas con base en los desplazamientos medidos en el extremo de la viga de los diferentes modelos ensayados, a medida en que se incrementó la carga. De estas figuras, las primeras cuatro corresponden a los ensayos con carga monotónica; las restantes, a carga cíclica. Se advierte que la figura 4 no es confiable, pues durante el ensayo se presentaron algunos inconvenientes.

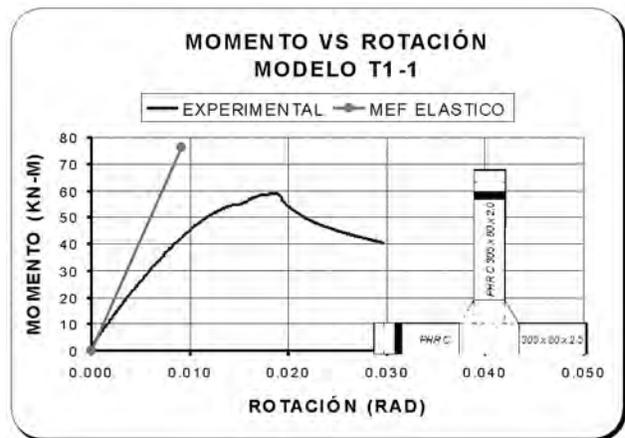


Figura 4. Curva M- $\theta$  para el modelo T1-1.

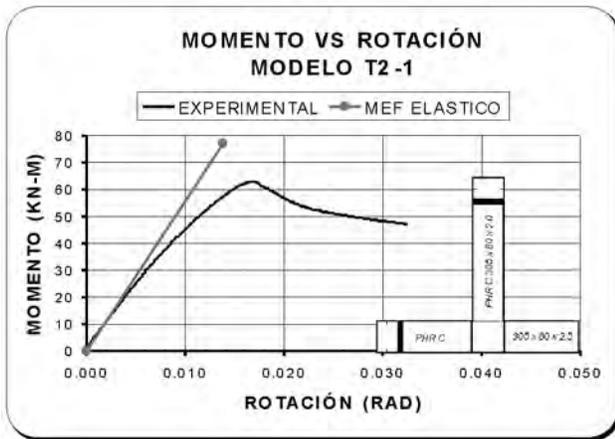


Figura 5. Curva M-θ para el modelo T2-1.

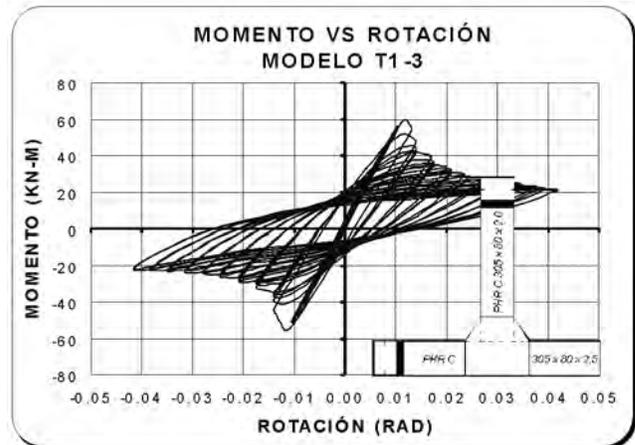


Figura 8. Curva M-θ para el modelo T1-3.

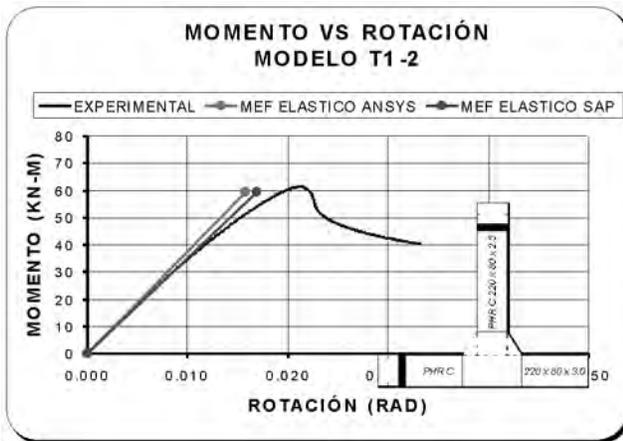


Figura 6. Curva M-θ para el modelo T1-2.

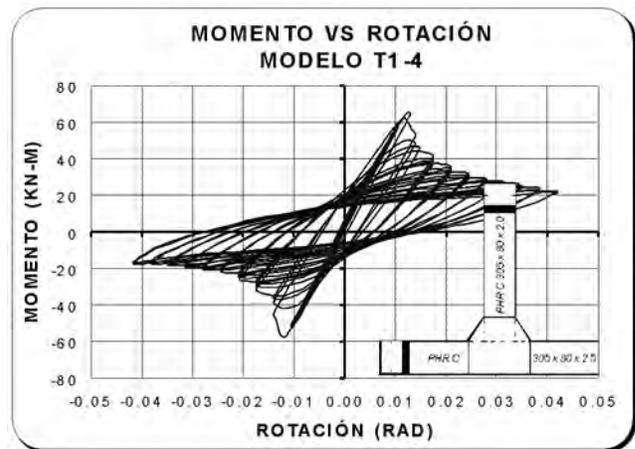


Figura 9. Curva M-θ para el modelo T1-4.

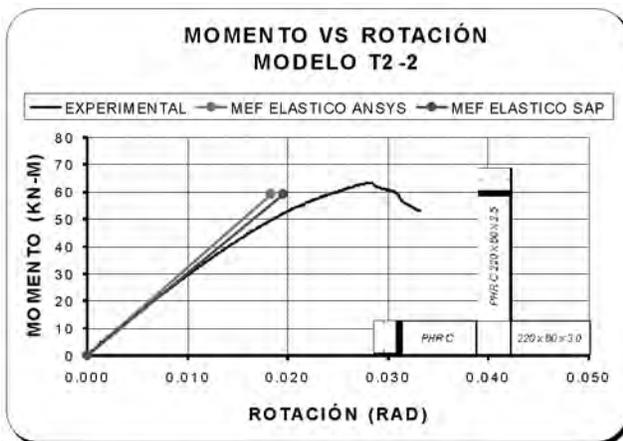


Figura 7. Curva M-θ para el modelo T2-2.

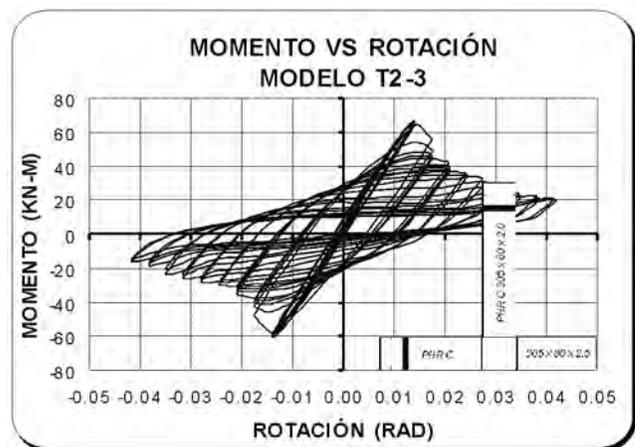


Figura 10. Curva M-θ para el modelo T2-3.

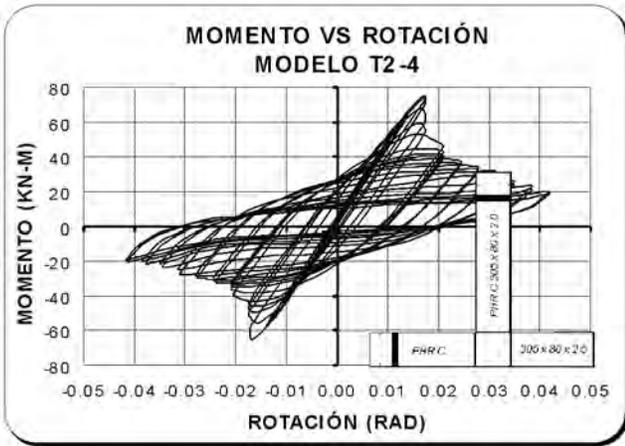


Figura 11. Curva M-θ para el modelo T2-4.

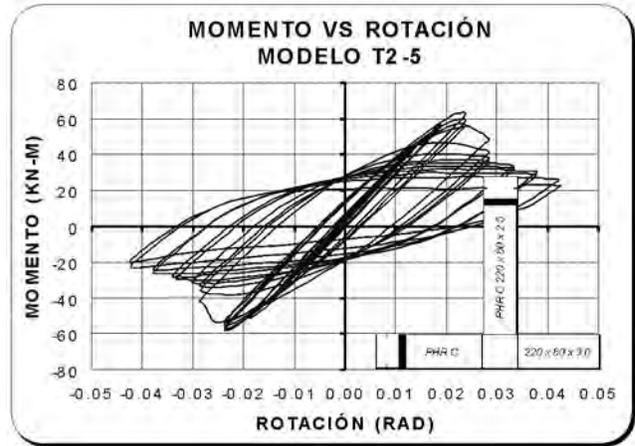


Figura 14. Curva M-θ para el modelo T2-5.

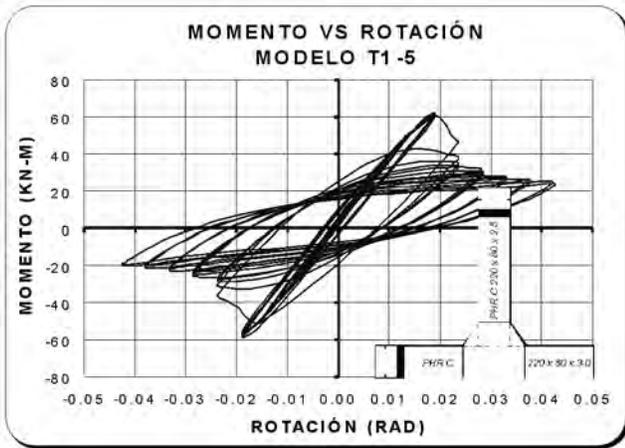


Figura 12. Curva M-θ para el modelo T1-5.

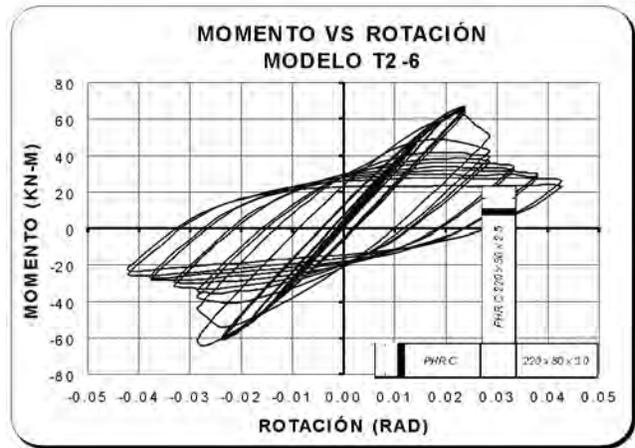


Figura 15. Curva M-θ para el modelo T2-6.

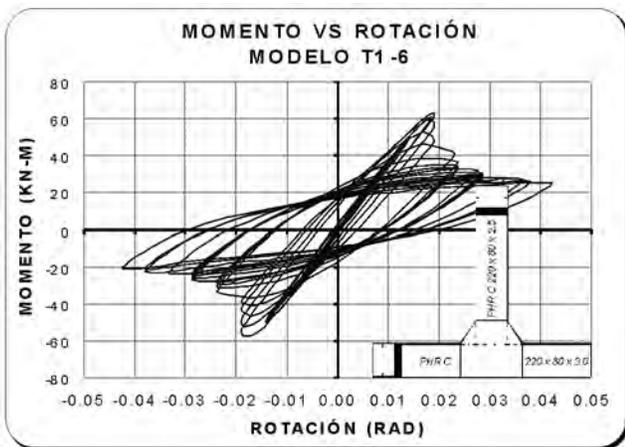


Figura 13. Curva M-θ para el modelo T1-6.

Análisis de curvas M-θ

Con el fin de visualizar los diferentes comportamientos, se calcularon varios índices cuya representación se puede observar en las figuras 16 y 17. Estos índices relacionan los momentos resistentes, medidos para diferentes rotaciones (0,01, 0,02 y 0,04 rad), con la resistencia teórica que incluye la reserva inelástica,  $M_p$ , y con la resistencia basada en la iniciación de la fluencia,  $M_y$ .

En las figuras 18 y 19 se presenta la comparación de la respuesta de los modelos para carga monotónica y para cíclica. Como se puede apreciar, si bien el comportamiento para llegar a la máxima resistencia es similar para los dos tipos de sollicitación (monotónica y cíclica), las sollicitaciones cíclicas producen una degradación de

resistencia más drástica.  
Estimación del factor R

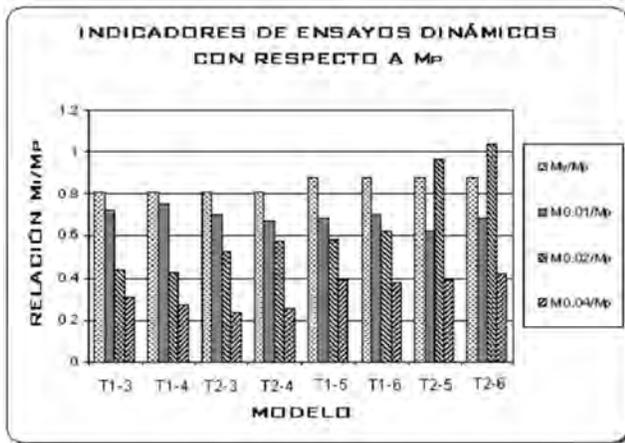


Figura 16. Indicadores con respecto a  $M_p$ .

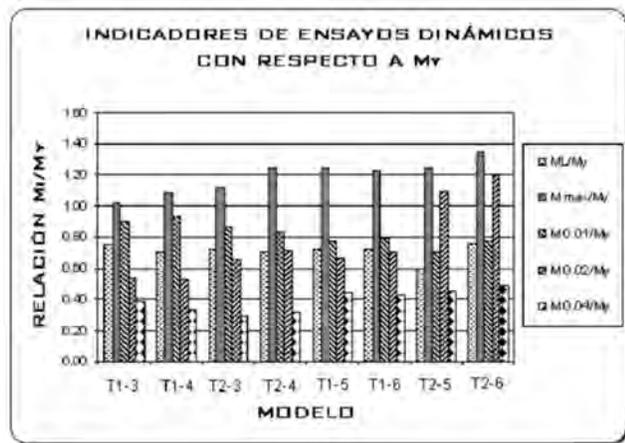


Figura 17. Indicadores con respecto a  $M_y$ .

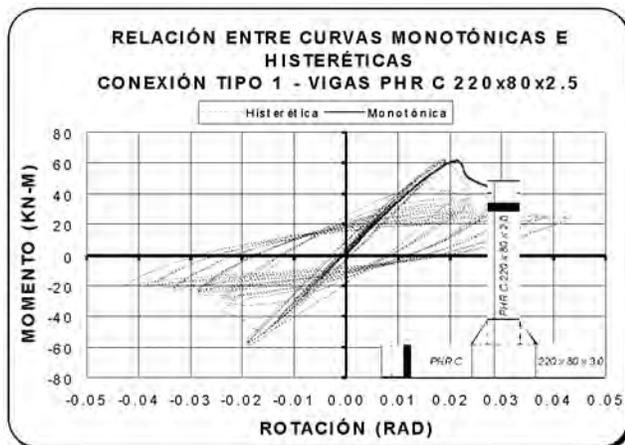


Figura 18. Curva histerética-monotónica. Conexión T1-viga PHR C 220x80x2.5.

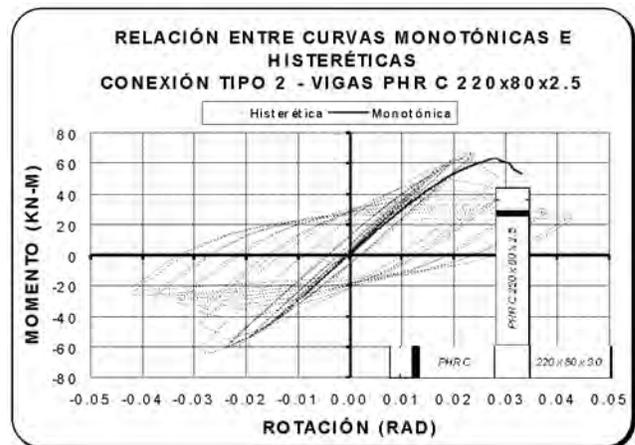


Figura 19. Curva histerética-monotónica. Conexión T2-viga PHR C 220x80x2.5.

Para la estimación de R, se utilizó el método del espectro de capacidad [4], y se evaluó para un pórtico con una luz de 6 m y tres pisos con altura de entrepisos igual a 2,5 m. Las sollicitaciones sísmicas de la estructura, de acuerdo con los resultados, corresponden a una zona de amenaza sísmica baja. Los resultados se observan en las figuras 20 y 21.

En síntesis, en concordancia con los resultados obtenidos en la presente investigación y el análisis de estos, se recomienda utilizar un valor de R del orden de 1,0 a 1,5 para estructuras que usen el tipo de conexiones estudiadas.

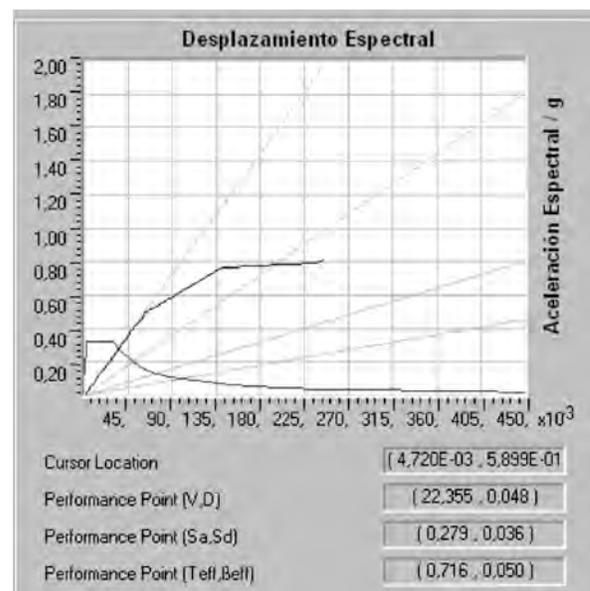


Figura 20. Método del espectro de capacidad. Conexión

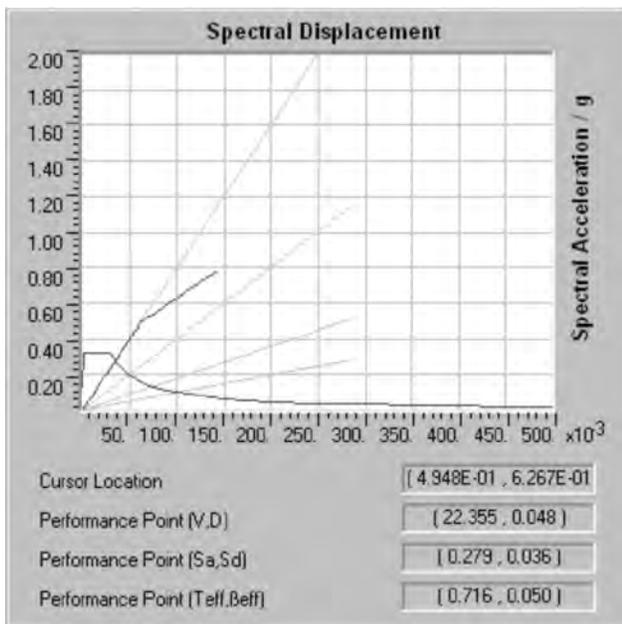


Figura 21. Método del espectro de capacidad. Conexión tipo 2.

### CALIBRACIÓN DEL MODELO TEÓRICO

#### Modelos elásticos

Como se puede observar en las figuras 4 a 7, los modelos elásticos (tanto con ANSYS como con SAP) predicen la curva monotónica M-θ con buena correlación hasta cuando la curva real deja de ser lineal. Esto se explica por el hecho de que en los modelos elásticos no se considera el comportamiento inelástico del material ni el pandeo local, entre otros.

Los esfuerzos de Von Mises en la zona de conexión, calculados mediante los modelos elásticos, resultan considerablemente mayores que el  $F_y$ , e incluso que el  $F_u$ , obtenidos de los ensayos de tensión. Esto no es real de acuerdo con la teoría de falla de materiales dúctiles, pero es lógico si se considera que estos modelos, por ser elásticos, no tienen en cuenta que existen esos esfuerzos límite ( $F_y$  y  $F_u$ ), ni los fenómenos de degradación, como se mencionó en el párrafo anterior.

#### Modelos inelásticos

En términos generales, las curvas M-θ estimadas mediante los modelos inelásticos guardan buena correlación con las curvas reales. Aunque las curvas estimadas pierden correlación aproximadamente hasta en un 11%, mantienen la misma tendencia a degra-

darse en resistencia. Esto se atribuye al hecho de que las curvas teóricas no contemplan el fenómeno de pandeo, aunque sí consideran el rango inelástico del material (figuras 22 y 23).

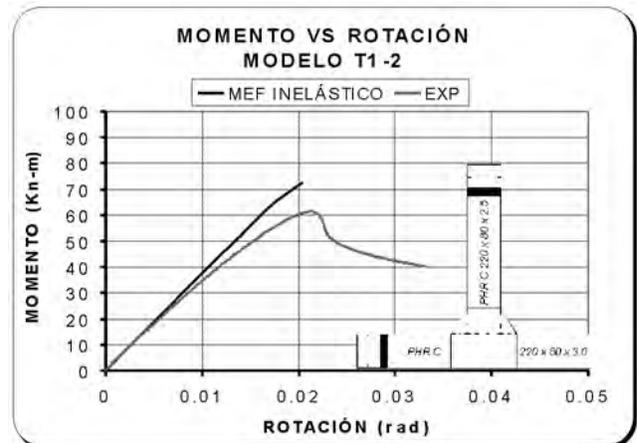


Figura 22. Modelo T1-2 teórico inelástico y real.

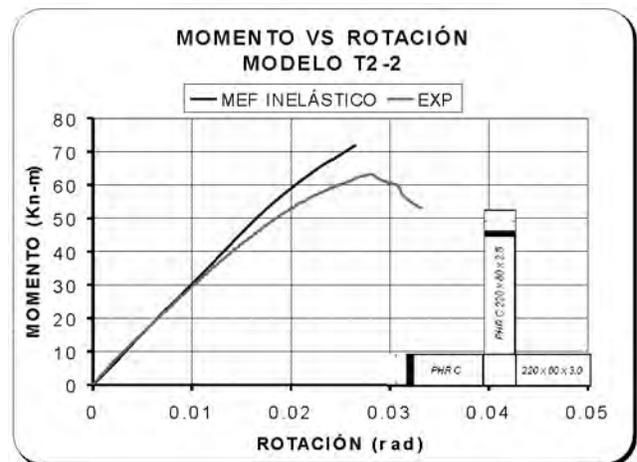


Figura 23. Modelo T2-2 teórico inelástico y real.

La distribución de esfuerzos estimada mediante los modelos inelásticos revela que los esfuerzos se concentran en la zona donde termina el refuerzo de las conexiones. Esto concuerda con lo que se deduce de los resultados de los modelos reales, dado que en esa misma zona se presentan los fenómenos de pandeo y rotura en las vigas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Abstrayendo el criterio de AISC para calificación de conexiones de perfiles laminados, no se recomienda el uso de la conexión tipo 1 en zonas de amenaza sísmica media o alta. Sin embargo, según los autores, se podría usar en zonas de amenaza sísmica baja si se garantiza que la respuesta de la estructura ante la demanda sísmica será prácticamente en rango elástico ( $R=1,0$  a  $1,5$ ).
- Análogo al otro tipo de conexión, para la conexión tipo 2 no se recomienda su uso en zonas de amenaza sísmica alta. A pesar de lo anterior, se recomienda para zonas de amenaza sísmica baja y media, siempre que se garantice el comportamiento elástico de la estructura, o con poca incursión en el rango plástico. ( $R=1,0$  a  $1,5$ ).
- Las conexiones para pórticos de lámina delgada estudiadas en la investigación antecesora muestran un comportamiento similar a las estudiadas en la presente. La degradación de resistencia ante cargas dinámicas es muy marcada, y eso limita su desempeño sísmico.
- El MEF es una herramienta confiable para estimar el comportamiento de conexiones para pórticos de lámina delgada, dada la alta correlación que presentaron los resultados de los modelos teóricos y reales.
- Para futuros estudios de calificación de conexiones para pórticos de lámina delgada, se recomienda, en principio, usar el mismo protocolo de carga utilizado para el presente estudio (tabla 2).

## REFERENCIAS

- [1] American Institute of Steel Construction. *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois: AISC, 2005.
- [2] American Iron and Steel Institute. *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*. Ed. 2001. AISI, 2002. +
- [3] Applied Technology Council. *Cumulative Damage Test and Fracture Analyses of Bolted-Welded Seismic Moment Frame Connections*. ATC, 1996. ATC 24.
- [4] Applied Technology Council. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. ATC, 1996. ATC 40.
- [5] Federal Emergency Management Agency, Sac Join Venture. *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings*. FEMA, 2000. FEMA 350.
- [6] Gallo Palma, Adriana C.; Narváez Cano, Juliana. *Comportamiento de uniones a momento en perfiles de lámina delgada doblados en frío*. Manizales, 2004. 170 p. Trabajo final (ingeniero civil). Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Departamento de Ingeniería Civil.
- [7] Hancock, Gregory; Wilkinson, Tim; Teh, Lip. *Welded Connections in High Strength Cold Formed Steel*. Sydney, Australia, Universidad de Sydney, 2006, 11 p.
- [8] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. *Ensayo de tracción para materiales metálicos. Método de ensayo a temperatura ambiente*. Bogotá, Colombia: ICONTEC, 2002. NTC 2.
- [9] López Guerrero. *Precalificación de conexiones para pórticos de lámina delgada*. Bogotá, 2005. 181 p. Tesis de maestría (magíster en ingeniería de estructuras). Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Facultad de Ingeniería. Posgrado en estructuras. Dirigida por el ingeniero Gabriel Valencia Clement.
- [10] Villar Salinas, Sergio. *Calificación de conexiones para pórticos de lámina delgada, 2ª parte*. Bogotá, 2007. 177 p. Tesis de maestría (magíster en ingeniería de estructuras). Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Facultad de Ingeniería. Posgrado en estructuras. Dirigida por el ingeniero Gabriel Valencia Clement.
- [11] Yu, Wei-Wen. *Cold-formed Steel Design*. 3ª ed. USA: John Wiley and Sons, 2000.



# Origen, características y tratamiento de los residuos producidos en una planta de purificación de agua (PPA)<sup>[1]</sup>

ENGELBERTO MANUEL CAÑAVERA ESPINOSA

Ingeniero civil, especialista en recursos hidráulicos y medio ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

CARLOS ANDRÉS DUARTE MATEUS

Ingeniero civil, especialista en recursos hidráulicos y medio ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

Ingeniero civil, MEEE, profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

Artículo recibido: 17/10/2007  
Evaluación par interno: 12/03/2008  
Aprobado: 13/03/2008

## Resumen

En este artículo se incluyen los resultados del estudio realizado para la caracterización y tratamiento de los lodos de una planta de purificación de agua. El informe reporta las características de los lodos sedimentados y de las aguas de lavado de los filtros, así como los cambios observados en su tratamiento. Se observó que la cantidad de residuo crudo producido es 610 m<sup>3</sup>/d y de 61 m<sup>3</sup>/d de lodo dispuesto. Las implicaciones del tratamiento de lodos se pueden evaluar a través de los resultados presentados.

**Palabras clave:** lodos, aguas de lavado de filtros, tratamiento de lodos, plantas de purificación de agua.

## Abstract

This paper shows the results of the study for the characterization and treatment of the residuals of a water treatment plant. The report encloses sludge, the characteristics of the wash water from the filters and the effects and changes due to the sludge treatment. It was observed that the amount of residuals produced was 610 m<sup>3</sup>/d, reduced at 61 m<sup>3</sup>/d for final disposal. The implications of the sludge treatment can be evaluated through the presentation of the results.

## INTRODUCCIÓN

Hasta hace pocos años en las plantas de purificación de agua (PPA) solo se gestionaba la producción de agua potable, sin prestar mucha atención a los lodos producidos en las operaciones y procesos de potabilización. Los lodos evaluados en este trabajo proceden de la planta El Dorado de la EAAB-ESP.

La planta de potabilización de agua El Dorado posee una capacidad de diseño de 1.600 L/s, trata actualmente un promedio de 400 L/s de agua cruda proveniente del embalse La Regadera, situado a 11 km de la planta, y se encuentra ubicada al suroriente de la ciudad de Bogotá, en la localidad de Usme.

El agua del embalse La Regadera es tratada mediante coagulación con cal y sulfato de aluminio granulado, floculación mecánica, sedimentación, filtración, desinfección con cloro gaseoso y estabilización con cal (figura 1).

## METODOLOGÍA

La caracterización y condiciones promedio de operación de la PPA y de su planta de tratamiento de lodos fue suministrada por los operadores de la planta, complementada y analizada en este trabajo [1].

## RESULTADOS

### Origen de los residuos

Los lodos de la PPA provienen de los sedimentadores de agua coagulada y floculada y del lavado de filtros. En los sedimentadores, los lodos se extraen por medio de cuatro sistemas de recolección y purga. Cada unidad de salida de lodos está constituida por una tolva concentradora y un tubo longitudinal de 6" recolector del lodo, colocado en el fondo de la tolva. Paralelo a este, se encuentra un tubo de descarga de 8" para realizar purgas periódicas. Los lodos se remueven abriendo ocho veces por día las cuatro válvulas de purga, consecutivamente, y tres veces al día las cuatro válvulas de desagüe.

La PPA posee doce filtros dobles de 2,1 m x 6,9 m, con un área de 29 m<sup>2</sup> cada uno, separados por un canal central de admisión de agua sedimentada y recolección de aguas de lavado de 1,43 m de ancho por 6,9 m de largo. Este canal sirve para recoger el agua del retrola-

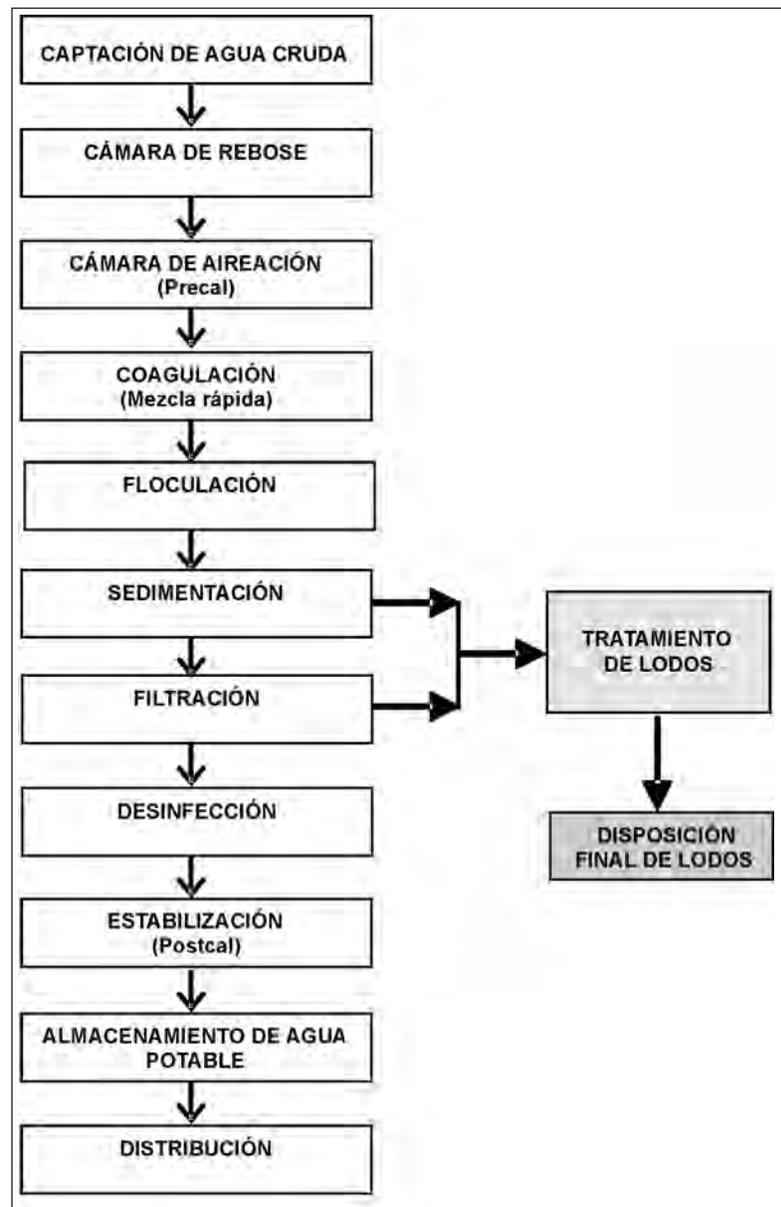


Figura 1. Diagrama de flujo de la planta El Dorado.

vado y sacarla hacia el canal de desagüe, desde donde se lleva a la planta de tratamiento de lodos. Los filtros se lavan durante 7 a 12 minutos con aire seco y agua.

La tasa de filtración es 240 m<sup>3</sup>/d; la carrera de filtración promedio, 81 horas; y el caudal de lavado promedio de cada filtro, 350 m<sup>3</sup>.

Por tanto, el caudal filtrado por cada unidad es:

$$Q_{\text{filtrado}} = (240 \times 29 \times 81) / 24 = 23.490 \text{ m}^3$$

El caudal y la tasa de lavado:

$$Q_{LAVADO} = \frac{350 \times 100}{23.490} = 1,5\%$$

$$\text{Tasa de lavado}_{(12 \text{ MINUTOS})} = \frac{350 \times 1.000}{29 \times 12 \times 60} = 16,8 \text{ mm/s}$$

A pesar de que se usa una tasa de lavado alta, 16,8 mm/s, el consumo de agua para lavado es porcentualmente bajo, 1,5%, debido a la prolongada carrera de filtración de 81 horas [2]. La figura 2 ilustra el origen y las cantidades de los lodos de la PPA.

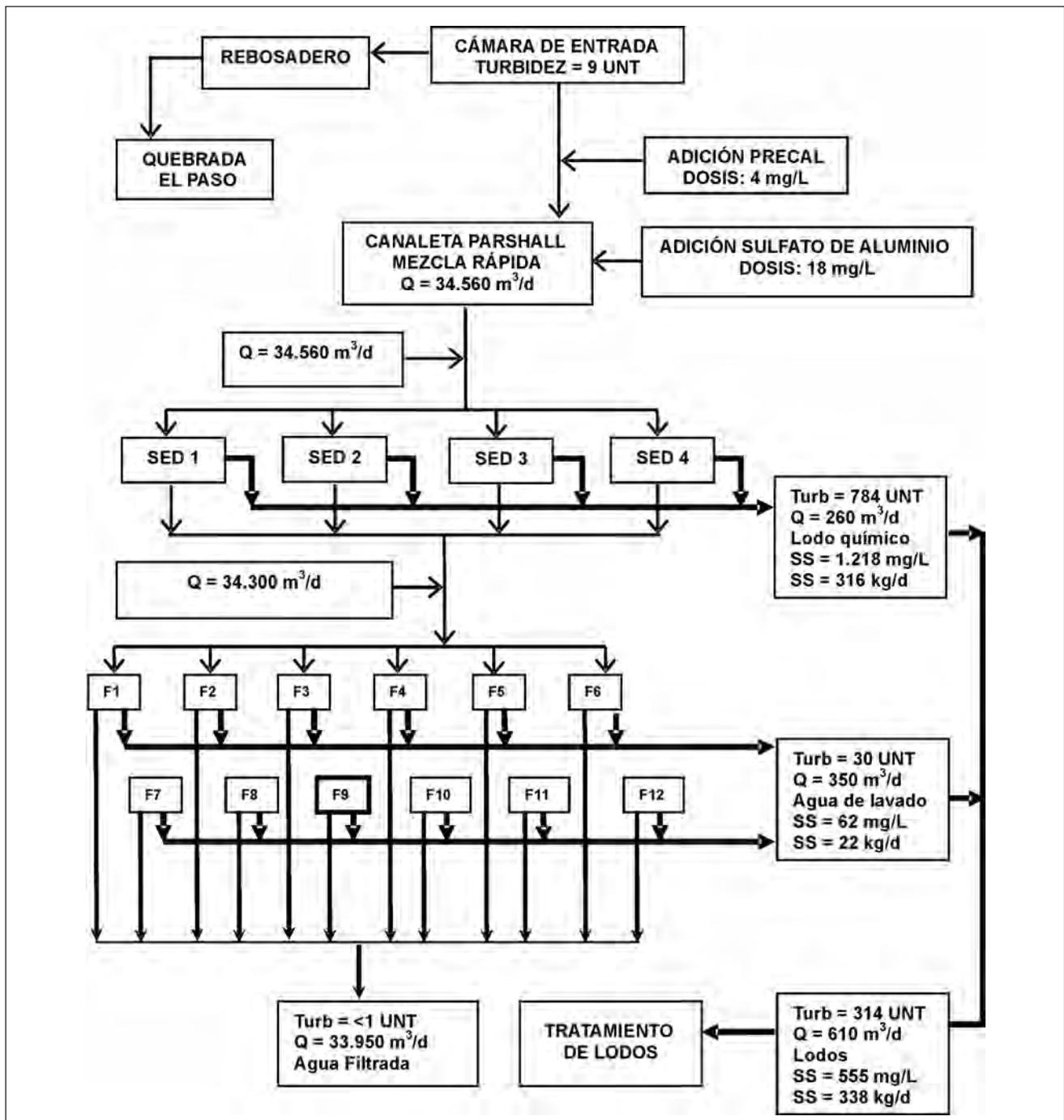


Figura 2. Origen de los lodos de la planta El Dorado.

Características de los residuos de la PPA

Las características de los lodos de los sedimentadores y de las aguas de lavado de los filtros se presentan en las tablas 1 y 2, respectivamente.

**Tabla 1**  
Características de los lodos de los sedimentadores

Muestreo	SS (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH
1	384	239	6,42
2	2.095	384	6,56
3	907	890	6,52
4	1.113	1.295	6,48
5	1.589	1.109	6,53
Promedio aritmético	1.218	784	6,50

**Tabla 2**  
Características de las aguas de lavado

Muestreo	SS (mg/L)	Turbiedad (UNT)	pH
1	81	24	8,24
2	58	32	6,74
3	63	14	8,33
4	47	49	7,30
5	62	32	7,78
Promedio aritmético	62	30	7,68

Tanto los lodos de los sedimentadores como las aguas de lavado de los filtros son aguas residuales de muy baja concentración de sólidos, 0,12% y 0,006%, respectivamente. Al unirlos conforman el lodo crudo afuente a la planta de tratamiento de lodos.

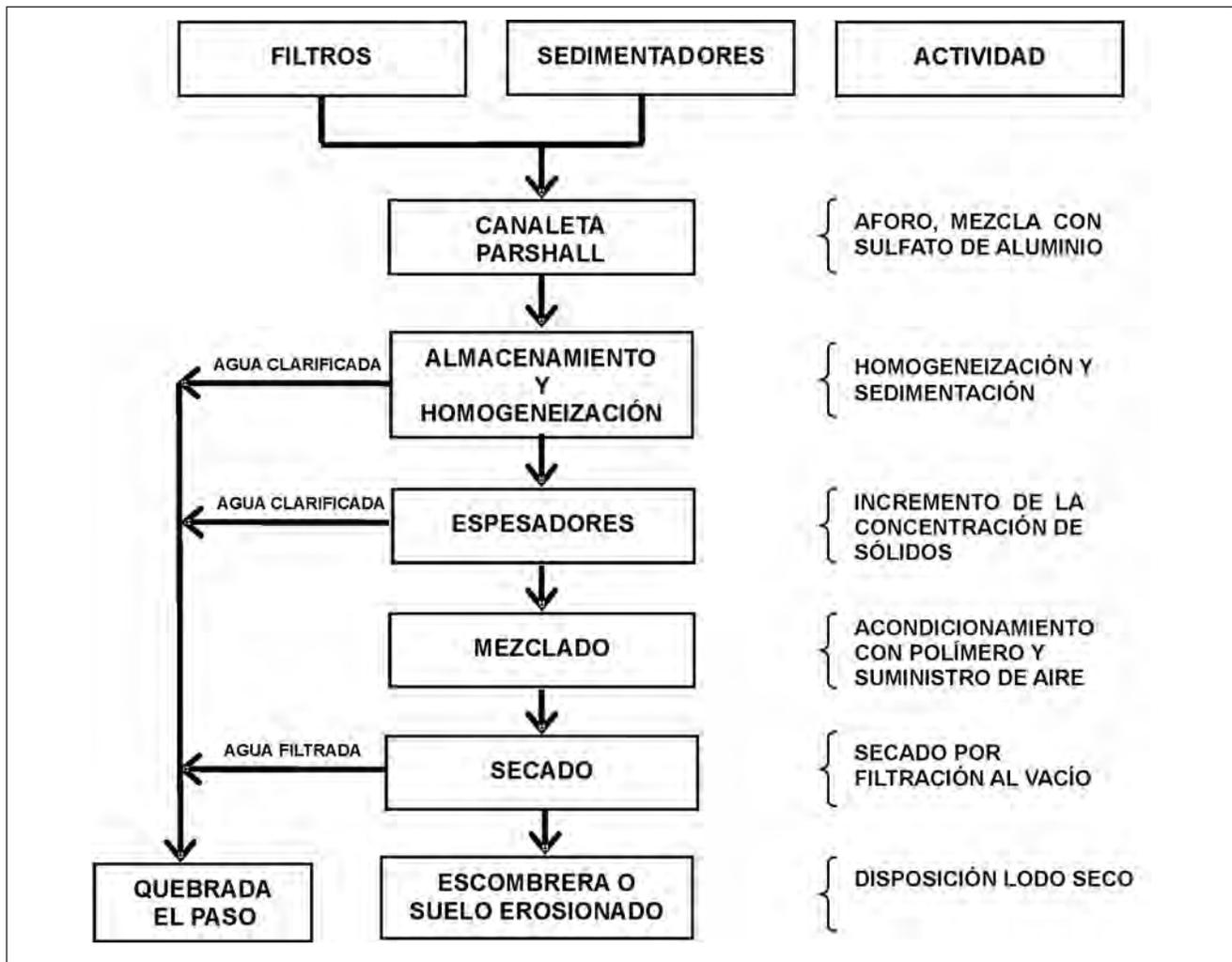


Figura 3. Proceso de tratamiento de lodos.

### Proceso de tratamiento de lodos

En la figura 3 se ilustra el proceso de tratamiento de lodos. Inicialmente se hace el aforo de los lodos por medio de una canaleta Parshall de 60 cm de garganta con control de ultrasonido y se agrega sulfato de aluminio. A continuación, el flujo de lodos pasa a dos tanques de homogeneización y sedimentación de 650 m<sup>3</sup>. El agua clarificada es vertida sobre la quebrada El Paso.

El lodo homogeneizado pasa a dos tanques espesadores para incrementar su contenido de sólidos; el sobrenadante es descargado en la quebrada El Paso.

Luego de espesar los lodos, se acondicionan para secado mediante la adición de polímero aniónico P 2515 en dosis de 0,0054 mg/L y aire. La mezcla entre el lodo espesado y el polímero se realiza por medio de una T de mezcla, en la cual el lodo ingresa por la parte inferior y el polímero por la parte superior. Se suministra aire para asegurar la mezcla e impedir que haya atascamiento del lodo en la tubería de bombeo hacia los lechos de secado.

Los lodos acondicionados son bombeados a los lechos de secado por una tubería de 6" y dos bombas centrífugas.

Los dos lechos de secado al vacío (figura 4) están constituidos por una capa nivelada de gravillas de 2" a 4" de espesor, sobre la cual se montan placas porosas pegadas con resina epóxica, cuyas dimensiones son 0,6 metros de alto, 17,2 m de largo y 5 metros de ancho, para un área total de 172 m<sup>2</sup>.



Figura 4. Lechos de secado.

Las placas se limpian mediante lavado con peróxido de hidrógeno. Cuando hay grasas y aceites, se lavan con

hipoclorito de sodio. Se usa cal comercial cuando hay mucha acumulación de polímero y ácido muriático, si se requiere remover materia orgánica.

El secado se realiza mediante succión del agua por la parte inferior de las placas porosas, previo un periodo de espera de 30 a 60 minutos para encender el sistema de filtración al vacío. Las grietas en el lodo indican la eliminación del agua. El periodo de secado es aproximadamente un día.

El lodo seco se dispone en escombreras cercanas o regándolos en zonas boscosas o de vegetación nativa.

### Balace másico de la planta de tratamiento de lodos

En la figura 5 se presenta el balance másico de la planta de tratamiento de lodos y en la tabla 3 se resumen sus características principales de operación.

**Tabla 3**  
Características de los lodos

Origen	Caudal (m <sup>3</sup> /d)	S.S (kg/d)	S.S (mg/L)	% Sólidos
Lodo químico	260	317	1.218	0.122
Aguas de lavado de filtros	350	22	62	0.006
Total lodos	610	338	555	0.055
Lodo homogeneizado	422	330	782	0.078
Lodo espesado	211	325	1.540	0,154
Lodo seco	61	323	5.300	0,530
Efluente 1	188	8	43	0.004
Efluente 2	211	5	25	0.002
Efluente 3	150	2	12	0.001
Efluente total	550	15	28	0.003

La carga de sólidos de los lodos sedimentados es 15 veces la carga de sólidos de los filtros.

Los lodos de la PPA tienen un contenido muy bajo de sólidos suspendidos, inferior a 0,12%.

La planta de tratamiento de lodos logra reducir el volumen de lodo que se va a disponer de 610 m<sup>3</sup>/d a 61 m<sup>3</sup>/d, es decir, 90%.

La planta de tratamiento de lodos logra incrementar la concentración de sólidos de los lodos crudos de 555 mg/L a 5.300 mg/L, es decir de 0,055 a 0,53%, equivalente a un incremento de 855%.

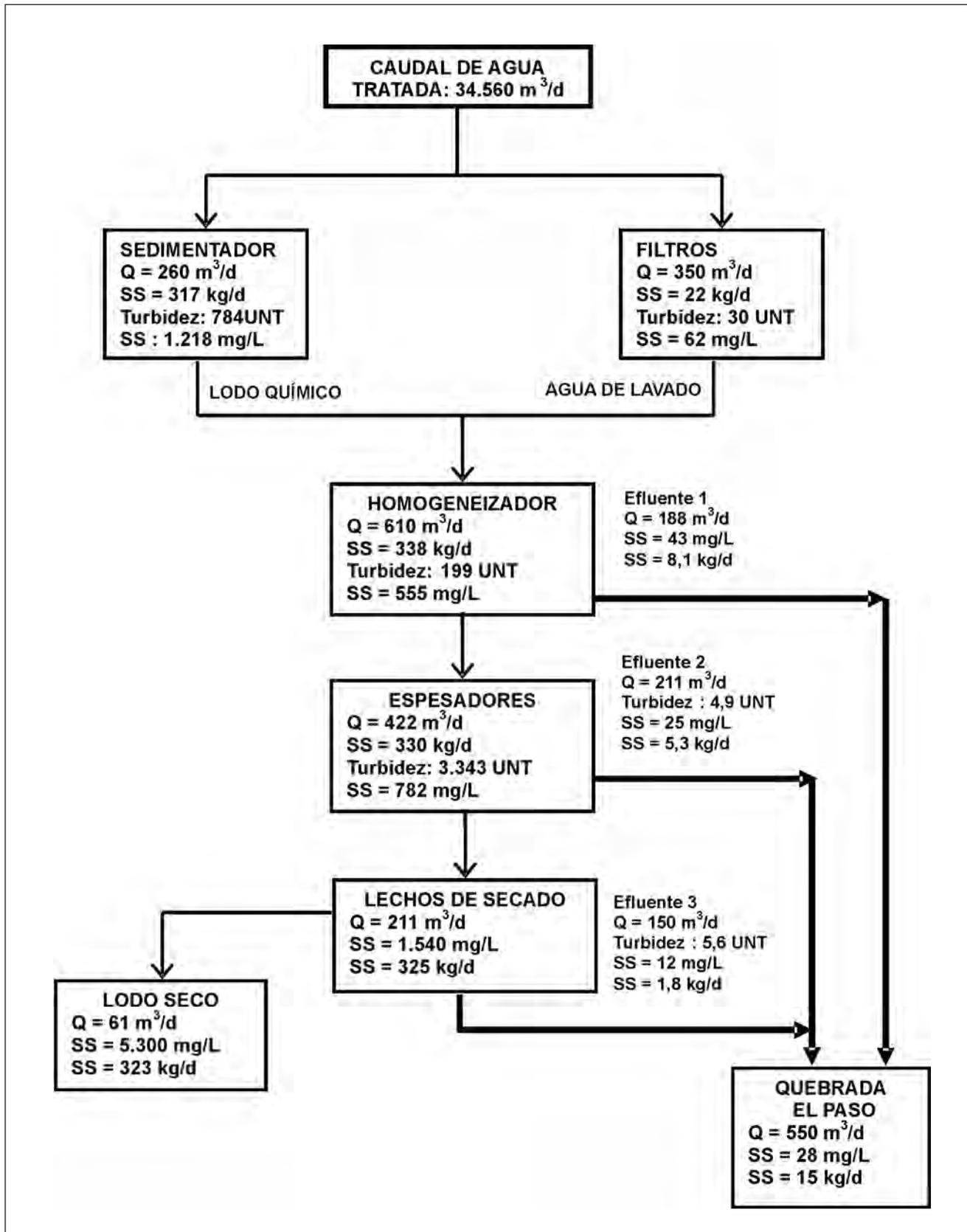


Figura 5. Balance de la planta de tratamiento de lodos.

El efluente líquido dispuesto sobre la quebrada contiene una cantidad mínima de sólidos suspendidos, 28 mg/L. Esta concentración no constituye valor objetable para su disposición.

## CONCLUSIONES

Los resultados presentados permiten afirmar:

- Los filtros de la PPA operan a una tasa de filtración de 240 m<sup>3</sup>/d con una carrera promedio de 81 horas y un consumo promedio de agua de lavado de 350 m<sup>3</sup> para un gasto de 1,5 % del agua filtrada. Este valor es porcentualmente bajo y muy económico, debido a la prolongada carrera de filtración.
- El caudal de lodo sedimentado es 260 m<sup>3</sup>/d, con una concentración promedio de sólidos muy baja: 0,12 %.
- El caudal de agua de lavado de filtros es 350 m<sup>3</sup>/d, con una concentración promedio mínima de sólidos: 0,006 %.
- El caudal de lodos afluente a la planta de tratamiento de lodos es 610 m<sup>3</sup>/d, con una concentración promedio de sólidos de 0,055 %.
- El espesamiento aumenta la concentración de sólidos de 782 mg/L (0,078%) a 1.540 mg/L (0,154%), para una eficiencia del 97%.
- El secado de los lodos incrementa su concentración de sólidos de 1.540 mg/L (0,154%) a 5.300 mg/L (0,53%), para una eficiencia de 244%.
- El área de secado de lodos es 172 m<sup>2</sup>, la cual permite una carga hidráulica de lodos de 1,2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> d y una carga de sólidos de 27 kg/m<sup>2</sup>d
- La planta de tratamiento de lodos de la PPA logra reducir el caudal de lodo que se va a disponer de 610 m<sup>3</sup>/d a 61 m<sup>3</sup>/d, es decir, 90%.
- La planta de tratamiento de lodos de la PPA incrementa la concentración de sólidos del lodo crudo de 555 mg/L (0,055%) a 5.300 mg/L (0,53%) en el lodo seco, es decir, 855%.
- El efluente líquido dispuesto sobre la quebrada es 550 m<sup>3</sup>/d, con una concentración de 28 mg/L de sólidos suspendidos y una carga de 15 kg/d. Este valor es muy aceptable para disposición en una fuente receptora superficial.

## REFERENCIAS

- [1] Cañavera Espinosa, E. M. y Duarte Mateus, C. A. *Origen, características y tratamiento de los lodos producidos en una planta de purificación de agua (PPA)*. Tesis para optar al título de especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, Escuela Colombiana de Ingeniería, septiembre de 2007.
- [2] Romero Rojas, J. A. *Purificación del agua*, 2ª edición, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2006.



# El ensayo Micro Deval. Sus características y ámbitos de aplicación <sup>[1,2]</sup>

SANDRA X. CAMPAGNOLI MARTÍNEZ

Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Especialista en Mecánica de suelos y cimentaciones de la Universidad Politécnica de Madrid, España. Especialista en Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia. Directora del Centro de estudios geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería. [scampa@escuelaing.edu.co](mailto:scampa@escuelaing.edu.co)

CLAUDIA PATRICIA LÓPEZ P.

Estudiante de último semestre de ingeniería civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Estudiante proyecto dirigido sobre el Ensayo Micro Deval. [claudi\\_lo@hotmail.com](mailto:claudi_lo@hotmail.com)

Artículo recibido: 15/08/2007  
Evaluación par interno: 26/02/2008  
Aprobado: 13/03/2008

## Resumen

En este documento se presentan los aspectos más relevantes del proceso de implementación del ensayo Micro Deval, contemplado por la Norma ASTM D 6928, "Standard test method for resistance of coarse aggregate to degradation by abrasion in the Micro-Deval apparatus", en los laboratorios de Suelos y Pavimentos del Centro de Estudios Geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería. En el proceso de implementación se evaluaron las principales características, ventajas y limitaciones del ensayo, los factores que afectan sus resultados, las correlaciones con otros ensayos relacionados con la dureza y con la durabilidad de los agregados, en especial con el ensayo de Desgaste Los Ángeles, y las correlaciones del ensayo con el comportamiento en servicio de los pavimentos, obtenidas en diferentes ambientes por diversos autores. Estos aspectos se tratan en este documento y se dejan para otro documento los resultados encontrados, al aplicar el ensayo Micro Deval, sobre agregados provenientes principalmente de fuentes de la ciudad de Bogotá.

Se concluye en general que el Ensayo Micro Deval tiene gran aceptación, es simple, consume poco tiempo, tiene buena repetibilidad, reproducibilidad y comprobada correlación con el comportamiento en servicio de los agregados, ya se usen para la conformación de capas granulares o para la elaboración de mezclas asfálticas.

**Palabras clave:** Agregados, pavimentos, resistencia al desgaste, dureza, durabilidad.

## Abstract

This report shows the most relevant aspects of the implementation of the Micro Deval test, according to ASTM D 6928, "Standard test method for resistance of coarse aggregate to degradation by abrasion in the Micro-Deval apparatus", at the Escuela Colombiana de Ingeniería Soils and Pavements Laboratory.

During the implementation process the main characteristics, advantages, weaknesses, limiting factors of the test were evaluated, as well as correlations with other tests related to hardness and durability of aggregates, particularly the Los Angeles test and correlations with pavements in-service performance in different environments according to different authors.

It is concluded that the Micro-Deval test is a widely accepted test, simple, no time consuming, has good repeatability, reproducibility and shows good correlation with aggregates in-service performance, either for granular bases or asphalt mixes. As other studies have shown, the Micro-Deval results had no correlation with the Los Angeles and aggregates absorption results.

EL ENSAYO MICRO DEVAL

Los ensayos corrientes para evaluar la dureza de los agregados, como el Desgaste Los Ángeles, el valor de impacto y el valor de trituración, se realizan en condición seca de la muestra. Teniendo en cuenta que la degradación de los materiales puede variar en presencia de agua y que en general los agregados son más susceptibles cuando están húmedos que cuando están secos, en los años sesenta, en Francia, se desarrolló el ensayo Micro Deval con el que se pretende caracterizar

el agregado de acuerdo con el comportamiento que presente en medio húmedo, es decir, en presencia de agua. El ensayo corresponde a una variación del ensayo de rozamiento Deval desarrollado en 1870 y usado principalmente para la caracterización del balasto para vías férreas.

El ensayo Micro Deval fue estandarizado por la Unión Europea y se encuentra contemplado en la Norma UNE EN 1097-1 “Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos.

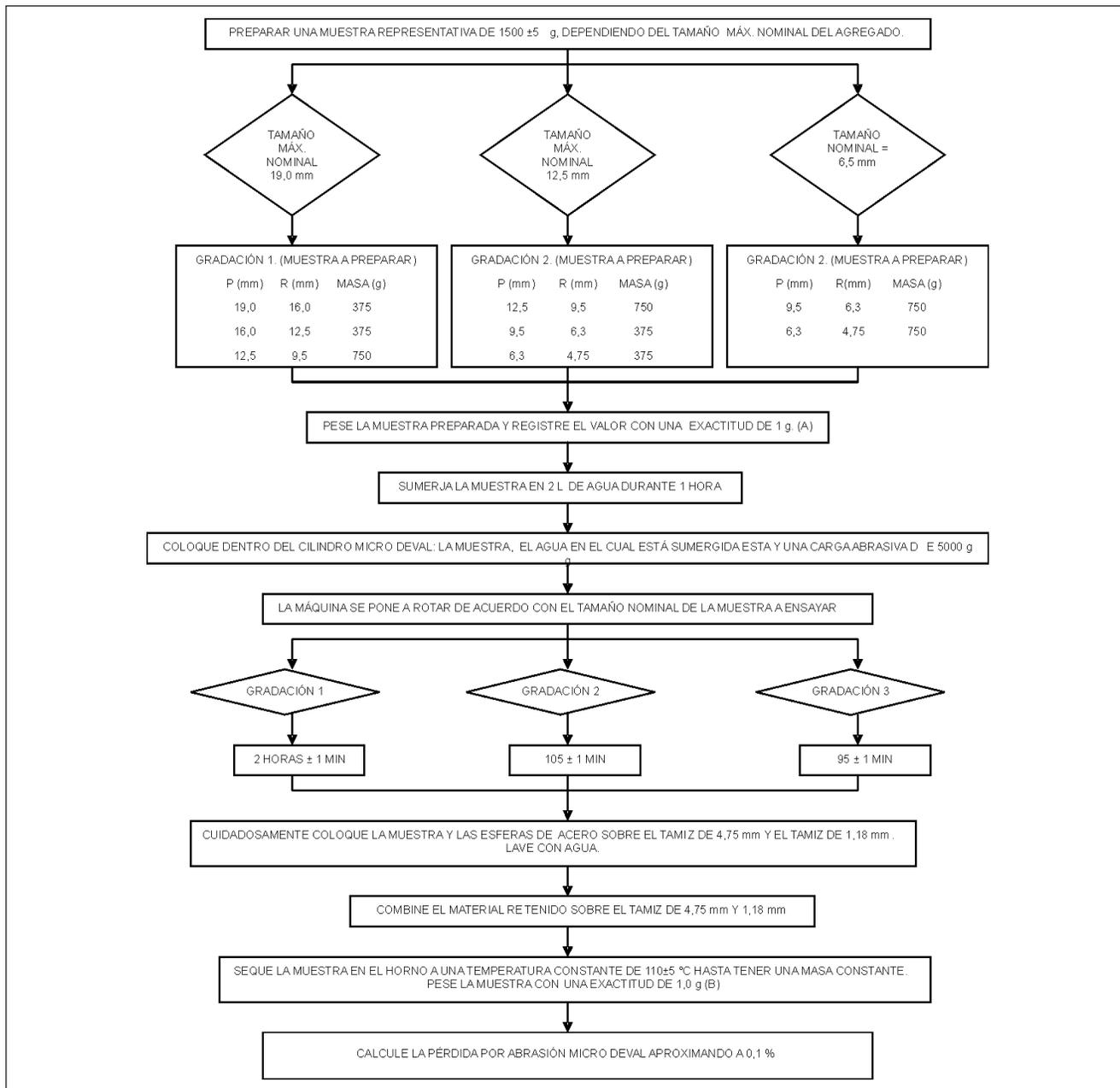


Figura 1. Diagrama de flujo del ensayo Micro Deval de acuerdo con la Norma ASTM D 6928.

Parte 1: Determinación de la resistencia al desgaste (Micro-Deval)”. Su uso en Norteamérica se inició en Canadá, donde fue modificado por el Ministerio de Transportes de Ontario con el propósito de evaluar la calidad tanto del agregado grueso como la del agregado fino y contemplar el ensayo como un complemento y posiblemente un sustituto de las pruebas de Desgaste Los Ángeles y de solidez en Sulfato de Magnesio [3].

En Estados Unidos, el ensayo Micro Deval está contemplado bajo la norma ASTM D 6928-03 “Standard test method for resistance of coarse aggregate to degradation by abrasion in the Micro-Deval apparatus”. Esta norma corresponde a la establecida como estándar de ensayo en las especificaciones IDU ET-2005 y, como se comentará mas adelante, difiere del estándar europeo. De acuerdo con esta norma, el ensayo Micro Deval es una medida de la durabilidad y de la resistencia a la abrasión de los agregados minerales como resultado de la combinación de acciones que incluyen abrasión y desgaste con esferas de acero en presencia de agua.

El procedimiento general del ensayo consiste en tomar una muestra de agregado con una gradación estándar, sumergirla en agua por no menos de una hora y colocarla en el cilindro del aparato Deval junto con 2,0 litros de agua y 5.000 g de una carga abrasiva, consistente en esferas de acero inoxidable de 9,5 mm de diámetro. El cilindro con la muestra, la carga y el agua se pone en rotación a una tasa de 100 rpm por un período no mayor de 2 horas, dependiendo del tamaño de las partículas. Al cabo de este tiempo, la muestra se recupera, se lava sobre el tamiz de 1,18 mm (No. 16) y el material retenido se seca en un horno. La pérdida se define como la cantidad de material que pasa el tamiz de 1,18 mm (No. 16), expresada como porcentaje de la masa de la muestra original.

En la figura 1 se muestra de manera detallada el diagrama de flujo del ensayo siguiendo el procedimiento propuesto en la norma ASTM D 6928-03. Como se aprecia en este diagrama, el procedimiento es relativamente simple y no consume mucho tiempo, por lo que se considera apropiado para especificarse como un ensayo de empleo rutinario en los laboratorios para la evaluación y el control de calidad de los agregados usados para la conformación de capas de estructuras de pavimento.

Según se ha demostrado en varios estudios, entre ellos uno realizado en la Universidad de Texas A&M

sobre 59 muestras de agregados, el ensayo Micro Deval presenta una muy baja variabilidad o, mejor, una alta reproducibilidad. Es decir, se obtienen en esencia resultados iguales cuando se realizan los ensayos en laboratorios diferentes sobre muestras idénticas. Estos resultados se pueden apreciar en la figura 2.

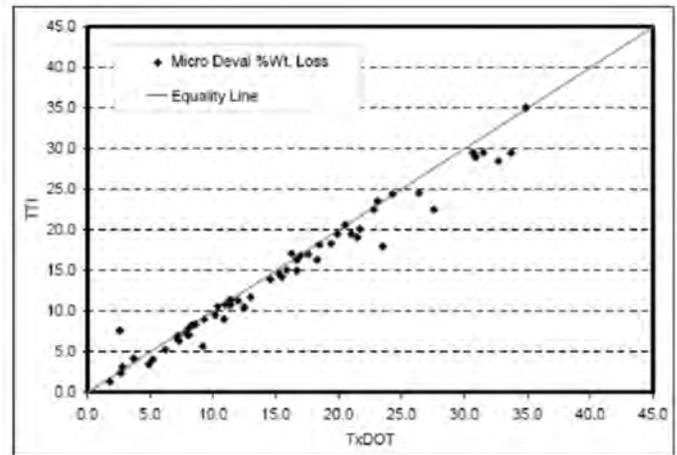
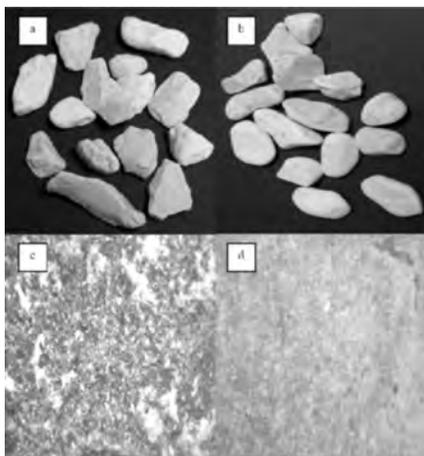


Figura 2. Análisis de la variabilidad del ensayo Micro Deval: resultados expresados como pérdida de peso (Mahmoud [4]).

En este mismo estudio [4] se desarrolló un método experimental para evaluar la resistencia al pulimento, a la abrasión y a la fractura de los agregados, basado en el ensayo Micro Deval y en un sistema de proyección de imagen de agregados (AIMS –Aggregate Imaging System). Se concluyó que el método para medir la degradación de los agregados es capaz de distinguir entre la fractura y la abrasión, definida esta última como la reducción en la angularidad del agregado, mientras que la fractura es equivalente a la rotura de las partículas. El aparato Micro Deval fue usado como mecanismo para el pulimento de los agregados. En la figura 3 se puede apreciar el efecto del ensayo sobre la textura de las partículas.

## EL ESTÁNDAR DE ENSAYO AMERICANO Y EL ESTÁNDAR EUROPEO

Como se mencionó en el apartado anterior, el ensayo Micro Deval fue normalizado por la Unión Europea bajo el estándar UNE-EN 1097-1. A primera vista parece que esta normativa es igual al estándar americano



**Figura 3.** Imágenes de los agregados: a) partículas de agregado antes del Micro Deval, b) partículas de agregado después del Micro Deval, c) textura superficial del agregado antes del Micro Deval, d) textura superficial del agregado después del Micro Deval [4].

definido en la ASTM D 6928-03. Sin embargo, las dos normas presentan diferencias en los equipos y en sus procedimientos, las cuales pueden dar lugar a la obtención de resultados no comparables, así se apliquen sobre un mismo agregado.

Frente a la norma ASTM, el estándar europeo presenta las siguientes diferencias en los equipos y procedimientos:

1. El cilindro de ensayo se especifica de menor altura (154 mm contra 170 a 177 mm).
2. Las esferas usadas como carga abrasiva, aun cuando deben pesar igual en conjunto (5.000 g), tienen mayor diámetro ( $10 \pm 0,5$  mm frente a  $9,5 \pm 0,5$  mm).
3. Se ensaya solo la fracción de agregado comprendida entre 10 mm y 14 mm (según la Norma ASTM se especifican 3 granulometrías: 19 mm a 9,5 mm, 12,5 mm a 4,8 mm y 9,5 mm a 4,8 mm).
4. Se toman masas de material por separado de 500  $\pm$  2 g (de acuerdo con la ASTM se toma una sola masa de material de 1500 g).
5. El ensayo se realiza durante 2 horas independientemente de la gradación de la muestra (en la ASTM varía dependiendo de la gradación entre 2 horas y  $95 \pm 1$  min).
6. Mediante tamizado con lavado, se rechaza el material más fino de 1,6 mm; este se considera pérdida

(según la ASTM, se rechaza el material más fino de 1,18 mm).

Este último aspecto es la diferencia más relevante, porque se esperaría que fuera mayor la masa de material ensayado que pase el tamiz de 1,6 mm frente a la que pase el de 1,18 mm. Esto daría lugar a mayores porcentajes de pérdida al seguir el procedimiento de la norma europea. En otras palabras, sobre un mismo material los resultados no serán comparables.

Se considera que las diferencias en los valores del porcentaje de pérdidas, medidos siguiendo estos dos procedimientos, pueden llegar a ser significativas; por tanto, cuando se realicen estudios comparativos del comportamiento de materiales, se recomienda tener especial cuidado al evaluar los resultados del ensayo Micro Deval obtenidos en diferentes ambientes y establecer claramente la norma de ensayo de la cual se derivaron.

Este documento resalta la diferencia entre estos dos procedimientos, ya que se está probando en nuestro medio un nuevo método de ensayo, para el cual se sigue el procedimiento estandarizado en las normas americanas ASTM, cuyos resultados se están especificando. En consecuencia, se sugiere que los valores que se fijen o establezcan como límites de la especificación, mientras no se tengan valores de referencia propios, se basen en la experiencia americana y no en la europea.

## MICRO DEVAL Y EL DESGASTE LOS ÁNGELES

Entre los ensayos más usados de manera tradicional para medir la dureza y la resistencia a la abrasión de los agregados se encuentra el Desgaste Los Ángeles. Para tener una idea de su empleo, baste con mencionar que en Estados Unidos el 94% de los estados lo especifican, usando criterios que varían en función de las condiciones de exposición y de la carga. Es claro que las especificaciones son más restrictivas para los materiales que conforman las capas de rodadura que para los usados en capas de base o inferiores [3].

Independientemente de las investigaciones que muestran que el ensayo de Desgaste Los Ángeles es un indicador pobre del comportamiento de los agregados en campo, desde su creación ha sido usado casi que universalmente para evaluar la calidad de los agregados empleados en la construcción.

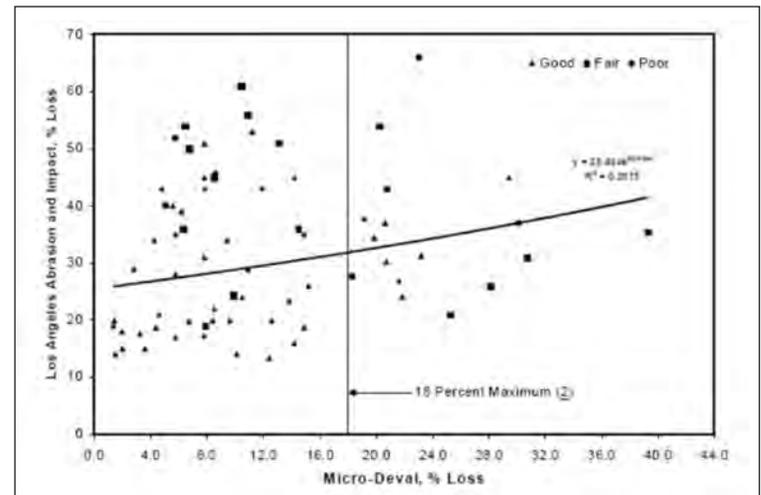
En cuanto al ensayo Micro Deval, una encuesta realizada durante un estudio llevado a cabo por el International Center for Aggregates Research –ICAR [5], cuyos resultados fueron publicados en 2006, indica que de 35 agencias de transporte de Estados Unidos, solamente 7 usan el ensayo y 4 más lo estaban considerando para uso futuro. Las razones que sustentan esta situación son que muchas agencias no consideran que el ensayo Micro Deval tenga ventajas sobre otros ensayos corrientemente en uso, como el de Desgaste Los Ángeles, o que no han tenido problemas en la cualificación de los agregados o simplemente que no tienen el tiempo o los recursos para investigar el ensayo Micro Deval y establecer los respectivos límites o especificaciones [5].

El ensayo de Desgaste Los Ángeles es una medida de la degradación de los agregados minerales con gradaciones estándar, que resulta de una combinación de acciones que incluyen abrasión, atrición, impacto y molienda en un tambor de acero que rota y contiene un número especificado de esferas de acero. Después de un número especificado de revoluciones, el contenido es retirado del tambor tamizándolo por la malla de 1,70 mm (No. 12) con el propósito de medir la degradación como un porcentaje de pérdida.

Varios investigadores sugieren que el Desgaste Los Ángeles no es un buen indicador de la calidad de los agregados usados en mezclas asfálticas, debido principalmente al tamaño y a la distancia de caída de las esferas de acero usadas como carga abrasiva, que generan elevadas fuerzas de impacto, las cuales en algunos materiales, como los granitos, tienden a producir altas pérdidas, aun cuando estos se comporten típicamente bien en el campo. Lo contrario sucede en materiales blandos de baja calidad, como las pizarras [7].

Estudios realizados por Cooley y otros [8] sobre 72 muestras de agregados con diferentes composiciones mineralógicas, procedentes de 8 estados del sureste de Estados Unidos, concluyen que no hay una relación general entre los resultados de los ensayos Micro Deval y de Desgaste Los Ángeles. Estos resultados se muestran en la figura 4, donde es posible apreciar que a mayores pérdidas en el ensayo de Desgaste Los Ángeles se presentan mayores pérdidas en el Micro Deval. Algunos autores atribuyen esta ausencia de correlación a la diferencia propia en los métodos de ensayo; mientras que en el ensayo Los Ángeles se

producen acciones de impacto y fragmentación sobre los agregados, en el ensayo Micro Deval se produce principalmente abrasión.



**Figura 4.** Comparación de los resultados de los ensayos Micro Deval y Desgaste Los Ángeles (8).

Quizás uno de los estudios más completos y más recientes sobre los ensayos Micro Deval, Desgaste Los Ángeles y Solidez en sulfato de sodio realizado con el propósito de evaluar la calidad de los agregados usados en capas de rodadura, fue desarrollado por Cuelho y otros [9] para el Departamento de Transportes del estado de Montana. En este proyecto se revisaron 16 estudios relacionados con la durabilidad de los agregados y se ensayaron 27 materiales diferentes siguiendo los procedimientos establecidos en cada uno de estos 3 métodos de ensayo. Los autores tuvieron en cuenta que cada procedimiento, debido a su misma naturaleza, da lugar a resultados únicos de pérdidas que permiten diferenciar entre agregados durables y no durables. En el estudio se fijaron los siguientes criterios para reconocer los agregados que clasifican como durables:

- Porcentaje de pérdida en el ensayo Micro Deval = 18%.
- Porcentaje de pérdida en el ensayo de Desgaste Los Ángeles = 40%.
- Porcentaje de pérdida en el ensayo de Solidez con sulfato de sodio = 12%.

Para facilitar la comparación directa de los métodos de ensayo, se normalizaron sus resultados dividiendo el valor de porcentaje de pérdida encontrado en el método entre su respectivo criterio. De esta forma, valores normalizados < 1,0 indican que el material clasifica como durable, mientras que si superan la unidad, el material es considerado no durable. En la figura 5 se observa una representación más clara de este análisis. Se aprecia que cuando los datos se encuentran en las zonas de texto gris, la concordancia entre los ensayos es pobre.

Siguiendo esta metodología, en la figura 6 se presentan los resultados encontrados en el estudio de Cuelho, comparando los ensayos Micro Deval y Desgaste Los Ángeles. De manera general, se aprecia una correlación pobre ( $R^2 = 0,456$ ) entre los dos ensayos. Sin embargo, solo un número reducido de muestras (4 de 27) no cumple el criterio del Micro Deval, pero sí cumple el criterio establecido para el Desgaste Los Ángeles, aun cuando para este último se encuentran muy próximos al límite. Igualmente, se puede ver una gran dispersión de los datos, alrededor de una línea a 45° o línea de mejor correlación, en el cuadrante en que ambos ensayos cumplen los criterios. Finalmente, de la observación de esta figura se puede concluir que el ensayo Micro Deval tiende a dar resultados más conservadores que el ensayo de Desgaste Los Ángeles, es decir, se rechazan más materiales, pues clasifican como no durables, usando los criterios establecidos para el Micro Deval.

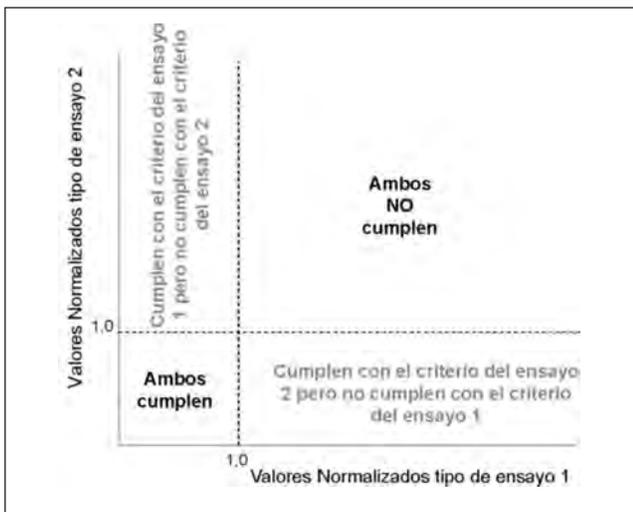


Figura 5. Resultados normalizados para propósitos de análisis comparativos entre ensayos.

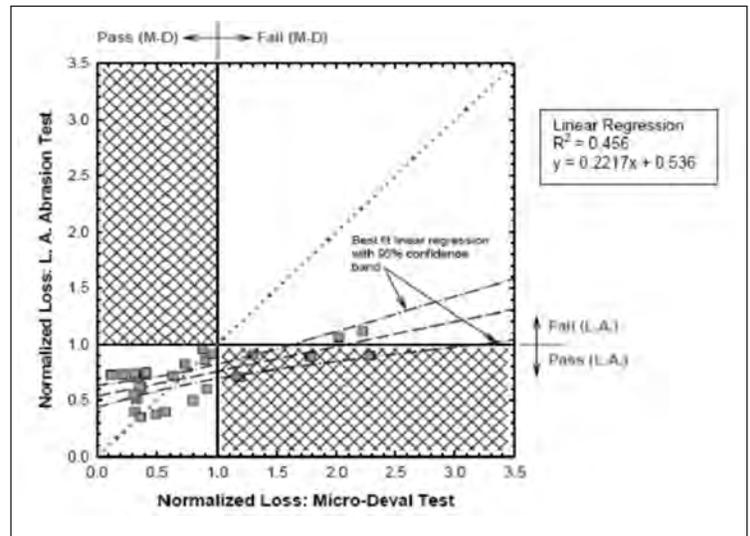


Figura 6. Comparación normalizada entre los ensayos Micro Deval y Desgaste Los Ángeles [9].

### EL MICRO DEVAL PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO EN SERVICIO

La mayoría de los métodos de ensayo en uso para caracterizar los agregados y evaluar su calidad relacionada con la dureza y la durabilidad fueron desarrollados en las décadas de 1930 y 1940. Debido a que estos ensayos fueron ideados de manera empírica, no se estableció claramente su relación con el comportamiento del agregado en el pavimento en servicio. Los ensayos permanecen hoy en día vigentes gracias a la experiencia recogida por los ingenieros, quienes han desarrollado criterios, con cierto nivel de confianza, acerca de cómo se correlacionan sus resultados con el comportamiento de los materiales en servicio. Aun así, su uso ha contribuido a seleccionar agregados de manera inconsistente, lo que en muchas ocasiones ha dado lugar a que el pavimento se comporte por debajo de lo esperado.

Varias agencias de transporte de Estados Unidos han evaluado el ensayo Micro Deval y, en general, han concluido que es un buen indicador del comportamiento del agregado en campo, particularmente si este se emplea en la conformación de capas de base, o subbase, y mezclas asfálticas en caliente.

En el *Nacional Cooperative Highway Research Program – NCHRP* [10], se desarrollaron estudios conducentes a evaluar los ensayos relacionados con el comportamiento de los agregados empleados en capas granulares en los

**Tabla 1**  
Clasificación de los métodos potenciales de ensayo. Propiedad medida: Dureza [10]

Ensayo	Predicción del comportamiento	Exactitud	Practicidad	Complejidad	Precisión	Costo
Los Ángeles	R	R	A	S	R	L
Valor de impacto	R	B	A	S	B	L
Valor de trituración	B	B	A	S	R	L
Valor de abrasión	R	R	A	MS	R	L
Micro Deval	B	R	A	M	R	L
Molino de durabilidad	R	B	A	MS	R	L
Ensayo giratorio	R	B	A	MS	R	M

B: Buena R: Regular A: Alta S: Simple MS: Medianamente simple M: Media L: Bajo

pavimentos, cuyos resultados se encuentran consignados en el reporte 453. En dicho estudio, inicialmente se identificaron los diferentes ensayos usados en la práctica, cuyos resultados son indicativos de las propiedades de los agregados, entre ellas la dureza. El grupo de investigadores los clasificó de manera cualitativa, según su juicio y experiencia, en función de la correlación del ensayo con el comportamiento en servicio y de la exactitud, practicidad, complejidad, precisión y costo general del ensayo. Los resultados de esta evaluación se muestran en la tabla 1.

Aun cuando en este estudio el Micro Deval no fue catalogado inicialmente bien en todos los aspectos considerados, durante la investigación se encontró que el ensayo se correlaciona significativamente con el comportamiento del agregado en capas granulares de pavimentos; por tanto, se recomendó emplearlo para evaluar la dureza y la resistencia a la abrasión.

El International Center for Aggregates Research-ICAR [5], evaluó sobre 117 fuentes de materiales la efectividad del ensayo Micro Deval, entre varios ensayos, para calificar exitosamente el comportamiento futuro de un agregado en campo. Concluyó que los resultados del ensayo son uno de los mejores indicadores usados para este propósito.

#### FACTORES QUE INFLUYEN EN LOS VALORES DEL MICRO DEVAL

Existen varios factores que pueden influir en los resultados del ensayo Micro Deval. Entre los más significativos están las propiedades físicas, en donde se resalta la absorción, y las propiedades mineralógicas y petrográficas de los agregados.

En general se ha encontrado que las gravas y rocas ígneas presentan menores porcentajes de pérdidas en el Micro Deval que las areniscas y las calizas, y que a medida que aumenta la absorción en el agregado, aumentan las pérdidas en el Micro Deval. Por ejemplo, en algunos estudios se han reportado valores de pérdidas de 6,5% para las gravas, de 15% para las areniscas, entre 11 y 15% para calizas con absorciones menores que 1% y de 20% en calizas con absorciones superiores a 1% [8, 11].

El efecto de la inmersión previa, en agua, de los agregados sobre los resultados del ensayo Micro Deval se ha reportado contradictorio. Mientras que algunas investigaciones realizadas en Canadá han encontrado que la inmersión del agregado en agua por más de 1 hora, antes de la realización del ensayo, tiene un efecto despreciable sobre los resultados y que este efecto es notorio si el agregado se sumerge por menos de 1 hora. Otros estudios reportan que no se aprecia efecto alguno de la inmersión previa de los agregados en las pérdidas del ensayo Micro Deval.

El Ministerio de Transportes de Ontario investigó el efecto del tamaño de la muestra sobre las pérdidas en el Micro Deval y halló que son independientes del tamaño de la muestra hasta pesos inferiores a 2000 gramos.

En las figuras 7 y 8 se observan los resultados del Micro Deval, de acuerdo con el tipo de agregado y la magnitud de la absorción, obtenidos sobre 52 fuentes diferentes de materiales, en el estudio desarrollado por Jayawickrama y otros [11]. En la figura 8 se puede apreciar que no existe gran correlación entre las pérdidas y la absorción, pero se observa una clara tendencia de estas al aumento con el incremento en la absorción del agregado.

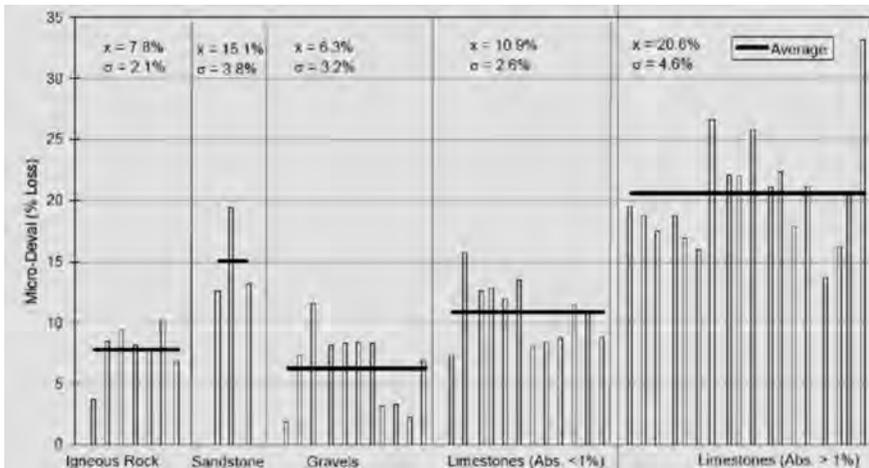


Figura 7. Porcentaje de pérdida en el ensayo Micro Deval según el tipo de agregado [11].

VALORES ESPECIFICADOS

En Norteamérica, es quizás el Ministerio de Transportes de Ontario el que haya realizado un número mayor de investigaciones involucrando el ensayo Micro Deval. La experiencia recopilada le ha permitido establecer, con un adecuado nivel de confianza, los valores máximos permisibles de las pérdidas en el ensayo, dependiendo del tipo de aplicación del agregado en el pavimento y de la magnitud de las solicitaciones a que va a ser sometido.

Por ejemplo, para agregados en mezclas asfálticas aplicadas como capas de rodadura en vías consideradas de bajos volúmenes de tránsito (TPD < 2500), el Ministerio recomienda una pérdida máxima de 17%, mientras que para tránsitos superiores, la magnitud de las pérdidas se sugiere entre 5 y 15%, dependiendo de la composición mineralógica del agregado: 5% para gravas

ígneas y metamórficas, 10% para diabasas y andesitas, y 15% para areniscas y gneis.

En la tabla 2 se presentan las especificaciones del Ministerio de Transportes de Ontario para diferentes aplicaciones de los agregados en el pavimento y para los agregados usados en capas granulares. El NCHRP recomienda los valores de porcentaje de pérdidas mostrados en la tabla 3, para la aplicación en zonas donde no se presente congelamiento y teniendo en cuenta el tránsito y las condiciones de humedad que prevalezcan.

Tabla 2

Especificaciones de dureza en Micro Deval para los agregados de acuerdo con su aplicación (Ministerio de Transportes de Ontario)

Aplicación	Micro Deval Pérdida máxima (%)
Subbase granular	30
Base granular	25
Capa de base de gradación abierta	17
Concretos asfálticos para capas de base	21
Concretos asfálticos para capas de rodadura (TPD < 2500)	17

Tabla 3

Recomendaciones de porcentaje de pérdidas en Micro Deval para agregados de capas granulares (NCHRP Report 453)

Tránsito	Alto		Medio		Bajo	
	Alta	Baja	Alta	Baja	Alta	Baja
% Pérdidas Micro Deval	≤ 15		≤ 30		≤ 45	

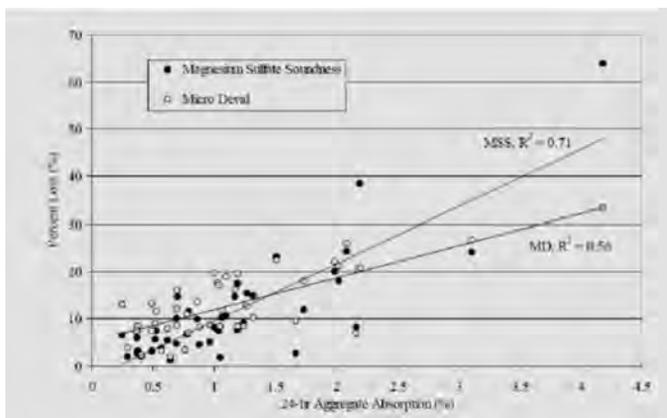


Figura 8. Influencia de la absorción en el porcentaje de pérdidas [11].

Comparando las anteriores especificaciones con las establecidas por el IDU en las ET-2005, y que de manera general se muestran resumidas en la tabla 4, se puede apreciar que estas últimas guardan un adecuado orden de magnitud, en especial con las establecidas por el Ministerio de Transportes de Ontario.

**Tabla 4**  
Especificaciones sobre el Micro Deval en el IDU ET, 2005

Material	Micro Deval, % máximo (en función del tránsito)
Subbase granular	30 – 35
Base granular	20 – 30
Capas de base e intermedias (Excepto mezclas de alto módulo)	25 – 30
Capas de rodadura	20 – 25

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La calidad de los agregados empleados en el pavimento constituye un factor importante que determina su comportamiento. Los agregados deben ser duros y resistentes a la abrasión para prevenir la trituración, la degradación y la desintegración que pueden presentarse cuando se encuentran almacenados, se transportan, se extienden, compactan y se someten a las cargas del tránsito. Igualmente, los agregados deben ser durables; resistentes a la rotura y a la desintegración cuando se someten a ciclos de humedecimiento y secado, calentamiento-enfriamiento o congelamiento-deshielo.
- Los ensayos que especifiquen o propongan las agencias viales para evaluar y controlar la calidad de los agregados deben ser confiables, reproducibles y repetibles, simples y suficientemente rápidos para usarse de manera rutinaria en los laboratorios. Los ensayos también deben ser capaces de discriminar agregados satisfactorios de los que no los son, con exactitud y de manera consistente.
- El Micro Deval es un ensayo que ha mostrado ser un buen indicador tanto de la dureza como de la durabilidad de los agregados. Estudios realizados en diferentes ambientes han probado que satisface o cumple los requerimientos enunciados en el apartado

anterior y que tiene la capacidad de determinar con éxito el comportamiento potencial en servicio de los agregados.

- El ensayo Micro Deval ha probado ser un procedimiento que sirve como mecanismo para el pulimento de los agregados y, si se acompaña de un sistema de proyección de imagen de agregados (AIMS – *Aggregate Imaging System*), es posible establecer la degradación de los mismos, distinguiendo entre la fractura y la abrasión de las partículas.
- Investigaciones realizadas en Estados Unidos y Canadá han concluido que el Micro Deval arroja mejores correlaciones entre la durabilidad de los agregados y el comportamiento del pavimento en servicio que cualquier otro ensayo corrientemente en uso, empleado para este mismo propósito, como los ensayos de solidez en sulfatos. Los estudios recomiendan evaluar los resultados de más de un ensayo, en este caso Micro Deval y Solidez en sulfato de magnesio, para tener una valoración más confiable de la durabilidad del agregado.
- Al comparar el estándar de ensayo americano (ASTM D6928) con el europeo (UNE- EN 1097-1), se aprecian discrepancias que pueden dar lugar a valores de porcentaje de pérdidas diferentes, al seguir estos dos procedimientos sobre un mismo agregado. Se recomienda que cuando se realicen estudios comparativos del comportamiento de materiales, se tenga especial cuidado al evaluar los resultados del ensayo Micro Deval obtenidos en diferentes ambientes y establecer claramente la norma de ensayo de la cual se derivaron.
- En este documento se resalta la diferencia entre los procedimientos fijados por la ASTM D6928 y por la UNE EN 1097-1, porque se está probando en nuestro medio un método de ensayo novedoso cuyos resultados se comienzan a especificar; por tanto, los valores que se fijen o establezcan como límites de la especificación, mientras no se tengan valores de referencia propios, se recomienda basarse en la experiencia americana y no en la europea.

## REFERENCIAS

- [1] López, C.P., Campagnoli, S.X. *Caracterización de agregados. Comparación de los ensayos Micro Deval y Desgaste en la Máquina de los Ángeles*. Trabajo Dirigido. Escuela Colombiana de Ingeniería, 2007.

- [2] Campagnoli, S.X., López, C.P. *Micro Deval –una prueba que complementa la evaluación de la calidad de los agregados usados en pavimentos*. XI Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, Manizales, 2007.
- [3] Wu, Y., Parker, F. & Kandhal, K. *Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soudness tests related to asphalt concrete performance in pavements*. NCAT Report No. 98-4. 1998.
- [4] Mahmoud, Enad M. *Development of experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage*. Thesis submitted to the Office of Graduate studies of Texas A&M University, 2005.
- [5] Fowler, D. W., Allen, J. J., Lange, A. & Range, P. *The prediction of coarse aggregate performance by Micro-Deval and Soudness relates aggregate tests*. Research Report ICAR 507-1F. International Center for Aggregates research. The University of Texas at Austin, 2006.
- [6] Hunt, E. A. *Micro-Deval Coarse aggregates Test Evaluation*. Final Report SR 547. Oregon Department of Transportation. May 2001.
- [7] Senior, S.A., Rogers, C.A. *Laboratory tests for predicting Coarse aggregate performance in Ontario*. Transportation research record 1301. Transportation research board, National Academy of Sciences, 1991.
- [8] Cooley, L. A., Huner, M. S. & James, R.H. *Micro-Deval testing of aggregates in the Southeast*. National Center for Asphalt Technology- NCAT Report 02-09. Auburn University, 2002.
- [9] Cuelho, P. E., Mokwa, R. L., *Comparative analysis of coarse surfacing aggregates using the Micro-Deval, L.A. Abrasion and Sulfate Soudness Tests*. Montana Department of Transportation, 2006.
- [10] National Cooperative Highway research program-NCHRP, *Performance-related tests of Aggregates for Use in unbound Pavements Layers*. NCHRP Report 453. Transportation Research board. National research Council, 2001.
- [11] Jayawickrama, P. W., Hossain, M. S., Phillips, F. *Evaluation of aggregate durability using Micro-Deval Test*. Transportation Research Board TRB 85th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM, 2006.

# The study of friction in joints

ALEXANDRE SILVA DE LIMA

Federal Center for Technological Education - CEFET/RJ  
CEP 26.041-271 – Rio de Janeiro, RJ, Brazil. e-mail: alima@cefet-rj.br

MAX SUELL DUTRA

Robotic and Automation Laboratory – COPPE/UFRJ. Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ  
Postal Box 68.503 – CEP 21.945-970 Rio de Janeiro, RJ, Brazil. e-mail: max@mecanica.coppe.ufrj.br

FABRÍCIO LOPES E SILVA

Robotic and Automation Laboratory – COPPE/UFRJ. Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ  
e-mail: falopes@ufrj.br

OMAR LENGERKE PÉREZ

Robotic and Automation Laboratory – COPPE/UFRJ. Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ  
Mechatronics and Automation Laboratory - UNAB. e-mail: olengerke@ufrj.br

Artículo recibido: 5/12/2007  
Evaluación par interno: 1/02/2008  
Aprobado: 13/03/2008

## Abstract

The study of friction is considered complex because it involves various physical phenomena. It depends on the lubrication and geometry of contact between the surfaces, on the material properties in contact, on the topology and the relative speed of the surfaces. In servomechanisms, friction can give origin to the phenomenon called stick-slip. This phenomenon creates intermittent motion at low speeds, causing trajectory errors and moreover the wear of the system. In this paper, a study on the friction in robotic joints is introduced. Some features of the robots, such as: precision in the positioning, trajectory modifications, and speed movement, are influenced by this tribologic phenomenon.

The antropomorphus manipulator is used in various areas of robotics such as: in underwater intervention, industrial applications, surgical robotics and entertainment. For this reason, this kind of robot was chosen as the object of this study.

**Keywords:** friction, tribology, manipulators, robotic.

## Resumen

El estudio de la fricción es complejo porque implica fenómenos físicos combinados. La fricción depende de la lubricación y geometría de contacto entre las superficies, de las propiedades de los materiales en contacto, de la topología y de la velocidad relativa de las superficies. En los servomecanismos, la fricción puede dar origen al fenómeno conocido como stick-slip, un movimiento intermitente a bajas velocidades, que ocasiona errores de trayectoria, además de desgaste del sistema. En este trabajo, se presenta un estudio sobre la fricción en juntas robóticas. Diversas características de los robots, como precisión en el posicionamiento, cambios de trayectoria y velocidades de movimientos son influenciadas por ese fenómeno tribológico. Como el manipulador antropomórfico es el más utilizado en diversas áreas de la robótica, como intervención submarina, aplicaciones industriales, robótica quirúrgica y entretenimiento, fue escogido como objeto de estudio.

**Palabras clave:** fricción, tribología, manipuladores, robótica.

## INTRODUCTION

Friction is a complex phenomenon because it involves various physical phenomena (Canudas et al., 1995). It depends on the lubrication and geometry of contact between surfaces, on the properties of the materials in contact, on the topology and the relative speed of the surfaces (Dupont, 1994). In servomechanisms friction can give origin to the phenomenon called stick-slip. This phenomenon means intermittent motion at low speeds, causing trajectory errors and moreover the wear of the system. (Dankowicz and Nordmark, 2000, Dupont and Dunlap, 1995).

Robotic manipulators are formed by the combination of structural elements (links), connected through joints in a kinematic chain. The first body is called base and the last one terminal extremity, where the terminal extremity component can be fixed. This may be a claw or a tool, as it is detailed in figure 1.

The joints can be rotative, allowing only relative rotation between two links,  $R$ , or they can be prismatic, allowing only the linear translation,  $P$ . In accordance with the combination of prismatic and rotation joints, the manipulators can be classified as: anthropomorphic (RRR), spherical (RRP), SCARA (RRP), cylindrical (RPP) and cartesian (PPP).

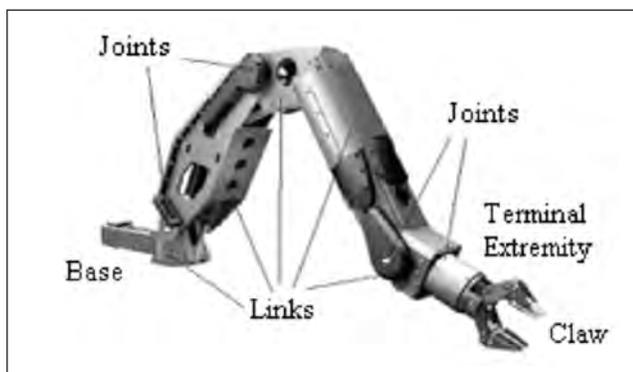


Figure 1. Underwater Robotic Manipulator (Lima, 2005).

## OBJECTIVE

The objective of this work was the study of friction in robotic joints. Many tasks of robots, such as precision in the positioning, changes in the direction of speed, and the speed of movement, are influenced by friction in the joints (Canudas et al., 1995).

The anthropomorphic manipulator is used in diverse areas of robotics such as in underwater intervention, industrial applications, surgical robotics, and entertainment among others; this study objective included those types. The arrangement of a typical anthropomorphic manipulator allows three movements of the arm (shoulder rotation, shoulder elevation and elbow rotation), three movements of the pulse (roll, pitch and yaw) and the movement to open and close the claw, as described in figure 2.

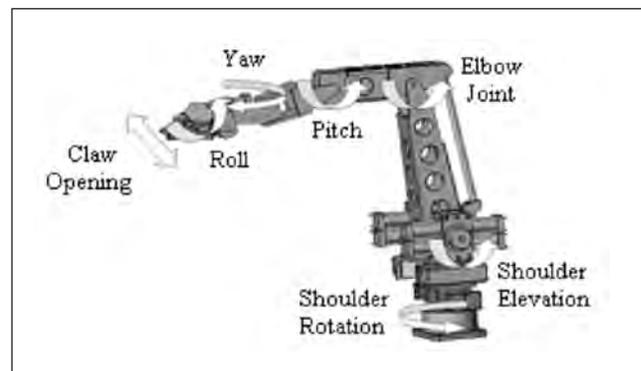


Figure 2. Identification of the Degrees of Freedom of the Anthropomorphic Arm (Lima, 2005).

## ROTATION JOINT

To analyze friction in the rotation joint, it is necessary to study its constructive characteristics. Through the study the pulse of joint of an anthropomorphic robot (figure 3) we can identify the use of rolling spheres to allow rotational movement.

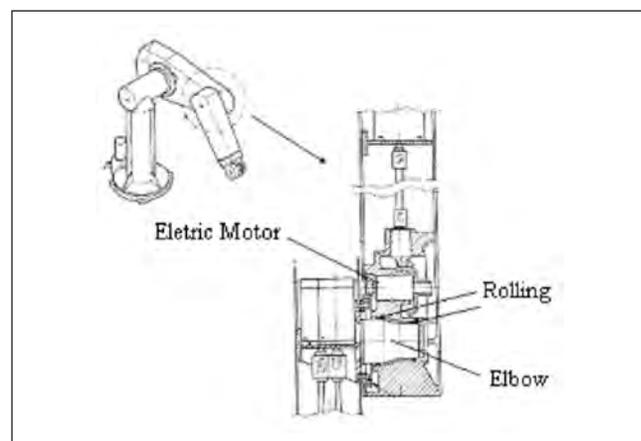


Figure 3. Joint Robotics of the Pulse (Rivin, 1987).

The type of rolling usually found in rotation joints of robots, is called rolling of fine section. It possesses fine rings; a small transversal section which is characterized by low weight, low friction and high rigidity.

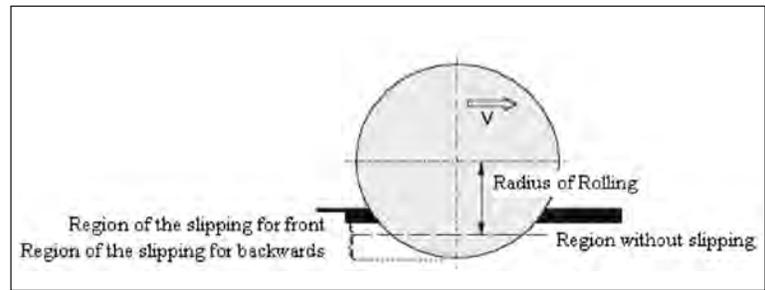
## FRICTION OF ROLLING

Friction of rolling is the resistance of movement which occurs when an object rolls on a surface. This occurs in two different cases, the first one, when the rolling body is irregular, such as a stone, and second one when the body has a smooth surface with high geometric precision. The term friction of rolling is normally restricted to bodies with approximately perfect form and very small superficial irregularities. In this case, the component of the force of friction due to roughness is very small and, consequently, there are verified low forces of friction, with a coefficient of friction in the range of  $5 \times 10^{-3}$  to  $10^{-5}$ . This resistance to the movement is due to a combination of many factors, such as the slipping in the contact region, losses on hysteresis and other losses of friction during the rolling.

### Slipping in the Region of Contact

The contact of two bodies (a sphere on a plain surface) at a point could be considered the occurrence of pure rolling. In the practical, a contact region is deformed elastically, and in extreme cases plastically, by the way that the contact is made on an area with a point in a different plan (Stoeterau, 2004).

In consequence, pure rolling only occurs on a very small number of points, whilst other points are submitted to a combination of rolling, and small slipping. Therefore this slipping is necessary to win an imposed resistance on the interface, which represents an increase of the force of friction of rolling. Although the slipping speed is usually small (about 5% or less than the speed of rolling), this small slipping is responsible, in many cases, for the biggest parcel of total resistance in rolling. In accordance with figure 4 there are regions where slipping occurs in the front and in the back.



**Figure 4.** Regions of Rolling in a Sphere on a Plain Surface (Stoeterau, 2004).

This expression for the total coefficient of friction of rolling can be written by Eq. (1).

$$\mu_r = \frac{V_e}{V_r} \mu_{ed} \quad (1)$$

Where:  $V_e$  is the slipping speed,  $V_r$  is the speed of rolling and  $\mu_{ed}$  the coefficient of dynamic friction in the slipping.

### Hysteresis Losses

During rolling, different regions of the surfaces in contact are tensioned, this tension disappears when the contact point is dislocated. When a volume element, in each body, is tensioned, this element accumulates elastic energy. When the tensions disappear, a great part of this energy is sent to the system, but a small part is lost in the form of heat, causing the elastic hysteresis of the material. This continued loss of energy corresponds to an increase in the resistance of rolling, adding one more component to the coefficient of friction of rolling.

### Other Losses for Friction during Rolling

Firstly, the loss of energy caused by the geometric imperfection of rolling, or the presence of a particle of dust in the rolling track. This would cause one component of friction due to roughness. Secondly, the loss of energy caused by plastic deformation in the imperfections of the rolling surface, since these surfaces are not perfectly smooth. The same thing occurs with particles pressured between the rolling surfaces.

Finally, there are losses of energy due to slipping in the interface of the rolling of bodies and the spacers as well as losses due to the viscosity of the oil or the existing grease. All these losses correspond to one component of the force of friction with a magnitude of  $10^{-4}$ .

### Laws of the Friction of Rolling

It is difficult to define laws for the friction of rolling with those analogous to the friction of slipping, because each one of the cited previously mechanisms has its own proper laws, and the friction coefficient will depend on more importantly on the component of the force of friction for that particular system. However, some considerations can be made:

1. Friction force change with the power of the load in the range of 1,2 and 2,4. In lightly loaded systems where the deformation in the contact is purely elastic, friction force generally changes with the high load to an exponent of 1,3. With weighed loads, where plastic deformation occurs, the exponent will be 2,0;
2. Friction force changes inversely with the radius of bending of rolling elements;
3. Friction force is less on smooth surfaces than on coarse surfaces. In fact, in almost all cases, the friction of rolling diminishes with the time due to the improvement of the superficial finishing caused by the action of rolling;
4. The force of static friction is generally the bigger of the dynamics, but the dynamics depend very little on the rolling speed, and even so diminish very little with the increase of this speed.

It can be concluded that the force of friction of rolling is a very small fraction of the applied load and is caused by diverse factors.

### Temperature in the Surface of Slipping

In order to have relative displacement between the surfaces of two bodies in contact, a force must be applied to produce friction resistance. With the continuity of slipping, this force must be maintained and, energy injected into the system. This energy is used

in various ways, among which we can cite: the elastic deformation of the bodies in contact and its supports, the elastic and plastic deformation of the imperfections in the points of contact, the formation of consuming particles and the emission of energy acoustics and heat. In the majority of cases, a high percentage of the total supplied energy is transformed into heat in the interface of the bodies in contact, raising the temperature during contact.

In the majority of situations where slipping occurs, contact occurs only in a few isolated junctions and not in all the apparent areas of contact. As they are small and receive substance values from thermal energy, the temperature is raised higher than the neighboring superficial regions. This high temperature is called flash temperature.

The generation of heat and the rise of the temperature during slipping are important for many reasons. In many cases, the resistance mechanics of one of the materials in contact diminishes drastically with the rise of temperature and is important in order to calculate the temperature during slipping in order to verify if it reaches critical values in the operation conditions of the system.

In other situations, a lubricant is used which functions in certain ranges of temperatures, or which decomposes at reached temperature value. The temperature of a surface resulting from the heat generated in friction is not easy to determine (determiner) because this can change significantly in different points of the surface. However, using simplified models, the order of

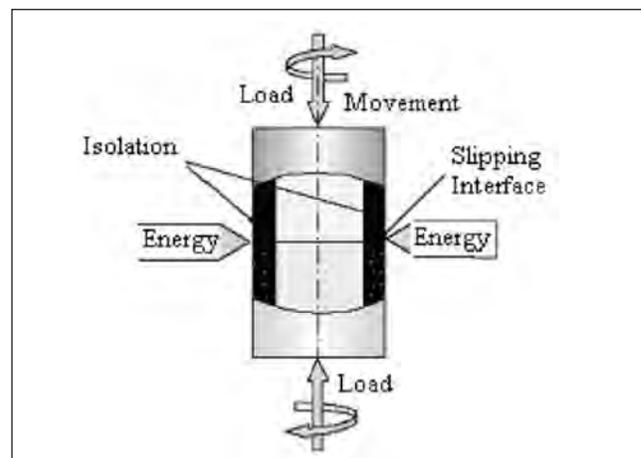


Figure 5. Rotation of Cylinders in Contact (Stoeterau, 2004).

magnitude of the temperature reached during slipping can be foreseen and the variables of the system which influence the superficial temperature can be defined.

The first type of system to be considered is the uniaxial case, represented, for example, by the slipping of two cylinders that come into contact, one across from the other, as it is shown in figure 5.

Eq. (2) represents this system, assuming that the friction is uniform in the contact area and that the only heat dissipation of the system is for conduction through the cylinders.

$$\theta_m = \frac{(1,35.P_c.\mu.V_c.t^{1/2})}{[J((k_1.\rho_1.c_1)^{1/2}(k_1.\rho_1.c_2)^{1/2})]} \quad (2)$$

Where:  $\theta_m$  is the temperature rise,  $P_c$  is the pressure in the contact area,  $\mu$  is the coefficient of friction,  $V_c$  is the speed of slipping,  $t$  is the time after the beginning of the slipping,  $J$  is the mechanical equivalent of the heat,  $k_i$  is the thermal conductivity,  $\rho_i$  is density and  $c_i$  is the specific heat of bodies 1 and 2.

The second type of analyzed system is that of one body in contact with another in a limited area and movement of its surface in such a way that the same region of the first body enters in contact with different regions of the second body.

This system is different from the previous one because a uniform distribution of temperature in the first body is reached, while the body with limited area of contact is cooled by the cold regions of the bigger body. This case is considered very simplified where the

contact consists of a circular junction of diameter  $2r$  sliding on the plain surface of another material with moderate speed, as it is observed in figure 6.

In Equation (3) the average value of the temperature of balance in the interface is presented.

$$\theta_m = \frac{\mu.L.V_c}{4.J.r(k_1 + k_2)} \quad (3)$$

Equation (4) presents the equation for very high speeds Eq. (4).

$$\theta_m = \frac{\mu.L.V_c}{3,6.J.r(1,1.k_2 + (\rho_1.c_1.r.V.k_1)^{1/2})} \quad (4)$$

For the highest speeds of slipping, Eq. (5) can be used.

$$\theta_m = \frac{\mu.L.V_c^{1/2}}{3,6.J(\rho_1.c_1.r^3.k_1)^{1/2}} \quad (5)$$

In these equations  $L$  is the normal force of the surface in the contact junction. In general, Eq. (5) can be used without the occurrence of numerous errors. The use of this equation, however, presents three problems: the coefficient of friction for the situation of slipping must be estimated in consideration, knowing that it can introduce errors of the 30% order; the estimated size of the junctions can easily vary from a factor 10 in relation to the estimated one; and heat is generated in some junctions and not in others. It is necessary to calculate  $L$  for each one of them.

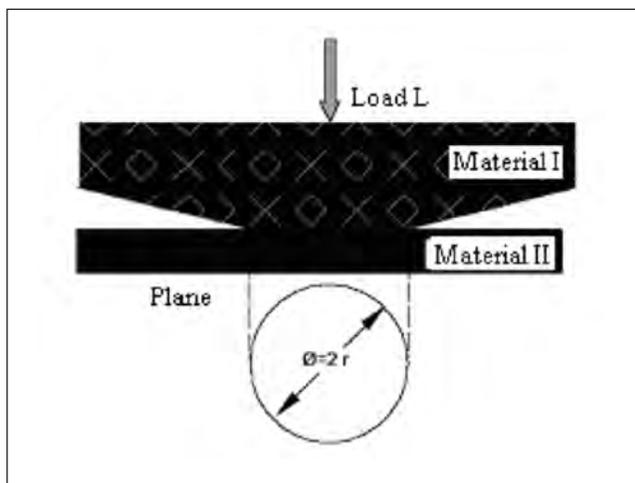


Figure 6. Junction Model Adopted (Stoeterau, 2004).

### Stick-Slip

The slipping of one body on another due to the action of a constant force occurs some times in speed constant, approximately constant, and other times at varying speeds. In the majority of slipping systems, this variation of the slipping speed is a serious problem and, therefore, methodology is sought in order to eliminate or to reduce the amplitude of these variations. All processes of stick-slip are caused by a variation in the force of friction motivated by other variable such as, distance, time and speed.

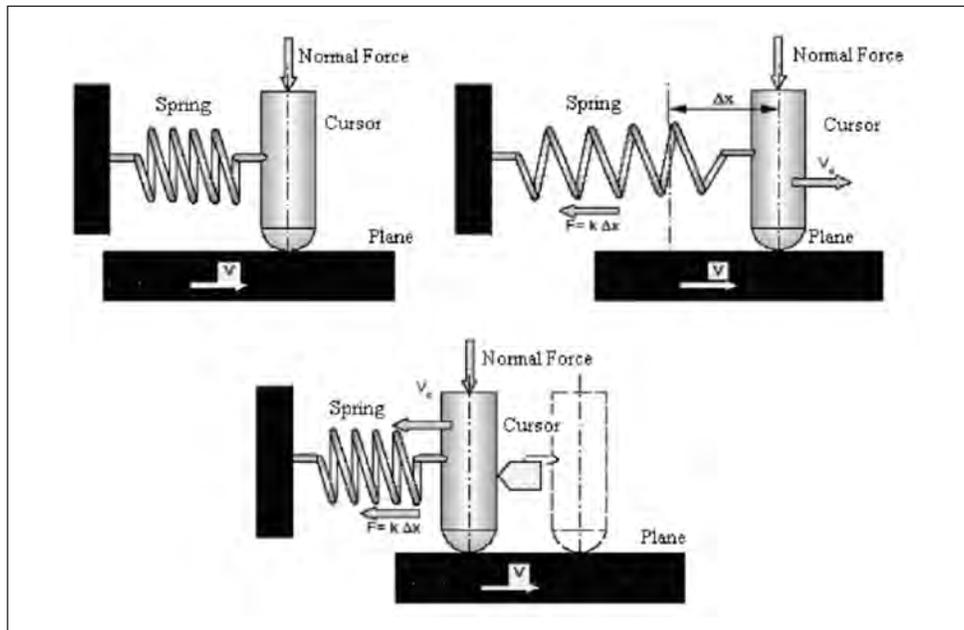


Figure 7. Representation of a System of Typical Friction (Stoeterau, 2004).

Irregular Stick-Slip - Controlled Displacement

Consider that figure 7 represents a typical situation of slipping involving a body (called cursor) fixed to a stationary support through a spring, and another one (plane) in movement with a constant speed  $V$ .

In this case considering the low speed, the cursor does not present difficulty to follow the movement of the plane when the damping is worthless. The graph of the force of friction in function of the displacement of the cursor in the plane is shown in figure 8.

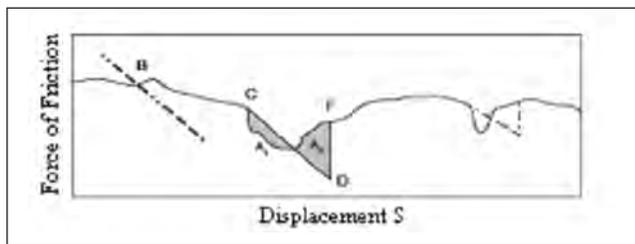


Figure 8. Graph of Force x Displacement (Stoeterau, 2004).

As this is a graphical Force versus Displacement, it can be indicated in the same diagram the function force versus displacement of the spring, which will be a straight line with inclination  $K$  through the representative

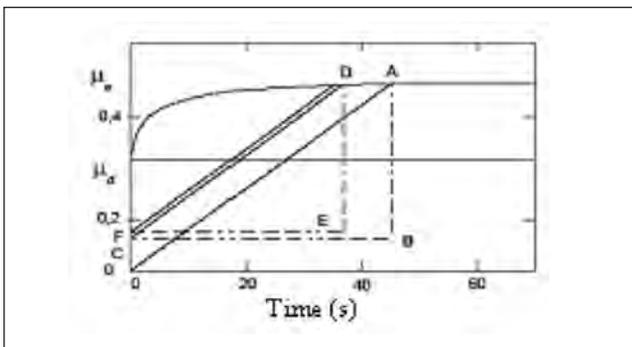
point of any position of the cursor. If the movement initiates in B, the cursor will be dislocated on the plate with constant speed until point C is reached. At this point the force accumulated in the spring is superior to the friction force, and its action; the cursor slides (slip) until point D, due to friction force having fallen abruptly.

At this point, the area  $A2$  (force of friction and displacement of the cursor) is equal to the area  $A1$  (energy of deformation accumulated in the spring and transformed into kinetic energy of the cursor). As the kinetic energy was total used, the force of the spring is significantly inferior to the force of friction, and to the cursor stop (stick) in relation to the plate and is dragged by it until the spring force, equaling to the friction force, causes the relative movement to restart.

A behavior of this type is called stick-slip irregular, and is caused by the variation of the friction force. This phenomenon occurs in metallic surfaces covered with lubricant film which has have been partially eroded. The fluctuation occurs because the cursor crosses regions covered for the lubricant film and regions without the film. If the spring is constructed with such a rigidity that its inclination in figure 8 is even bigger than the maximum inclination of the graph Force of Friction versus Displacement, stick-slip irregular will be prevented.

### Regular Stick-Slip - Controlled by Time

This type is considered the classic form of stick-slip and occurs when the coefficient of static friction is much bigger than the dynamic coefficient. Consider a slipping situation where the plate of figure 7 has a low speed when compared with the maximum speed of the cursor during the slipping and that the external damping is worthless. This simple model can be used to explain regular stick-slip. Assuming that the coefficient of static friction is in the function of the contact time, presenting a behavior as shown in figure 9 where the dynamic coefficient remains constant.



**Figure 9.** Static coefficient in Function of the Time of Repose (Stoeterau, 2004).

Putting into motion the plate with speed  $V$ , the force of the spring grows with time at the rate  $kVt$ , which can be registered in figure 9 as a straight line from the origin, with inclination  $kV/L$ . The elastic energy accumulates in the spring, but the force of the spring is insufficient to produce the friction force and the cursor remains motionless in relation to the plate.

The balance situation, that will occur due to the force of the spring equals  $md$ . The constant  $L$  was exceeded and the cursor which was represented in the graph by point  $C$  (the force of the spring is not null). Continuing the displacement of the plate, a new cycle initiates and slippage will only occur at point  $D$ , therefore the cursor is stopped and  $\mu_e > \mu_d$ . Finally, a balance state is reached. If  $V$  or  $k$  are increased the lines will have a bigger inclination and stick-slip will have a lesser amplitude.

### MODELING

Friction can be modeled using the static model. The model of the friction of Coulomb (Eq. (6)) is a classic static modeling. This modeling can be viewed as inadequate for the analysis and the simulation of feedback systems because of the discontinuities due to the null speeds (Gomes, 1995).

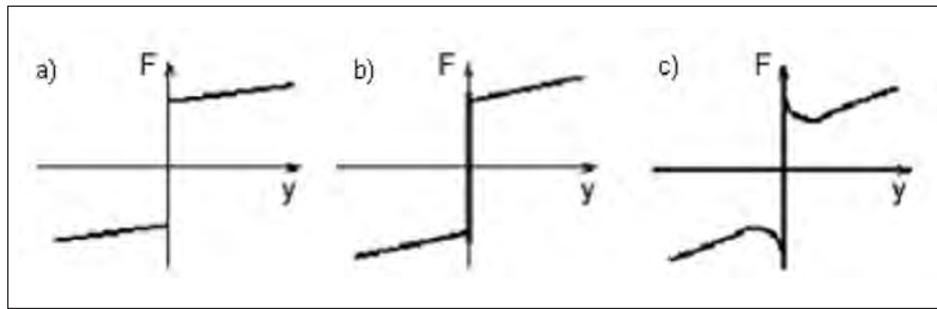
$$F = B \cdot \dot{\theta} + S \cdot \text{sign}(\dot{\theta}) \quad (6)$$

Where:  $F$  is the force of resultant friction,  $\dot{\theta}$  is the speed,  $B$  and  $S$  represent the components of the viscous and static friction respectively. In relation to the modeling of friction some definitions are important (Dupont, 1994 and Canudas et al., 1995):

1. The static friction is the force necessary to initiate the movement from the repose;
2. The friction of Coulomb is the component of the friction which does not depend on the value of the speed;
3. In the viscous friction the speed depends on the friction;
4. The Dahl effect is the elastic deformation of the roughness of the junction which holds as a linear spring for small displacements;
5. The Break-away forces, is the force necessary to achieve the friction static;
6. The Stribeck is the phenomenon of the reduction of friction due to the increase of the speed in low speeds;
7. The memory of friction is the delay between changes in the values of speed and the force of friction.

The classic models of friction are demonstrated on the static map which relates the speed and the force of friction. The typical examples are combinations of the friction of Coulomb, the viscous friction, the static friction and the Stribeck, as it is shown in the figure 10.

It must be noted that the static model, does not contain the observed phenomena of friction, such as the hysteresis, the Dahl effect and the variations of break-way forces (Canudas et al., 1995). The friction model which involves the dynamics is necessary in order to describe these phenomena accurately. As an example of modeling the static model of four parameters is given by Eq. (7), as well as in Sprenger et al, 1997. This



**Figure 10.** Static model of the friction: a) Coulomb, b) Static Friction and c) Stribeck (Gomes, 2005).

formulation has an exponential term when considering Stribeck, and prevents discontinuities in null speeds. This model is an extension of the classic model of Coulomb presented in Eq. (6) (Armstrong-Hélouvry, Dupont and Canudas, 1994).

$$F = \text{offset} + \text{sign}(\dot{\theta}) \cdot (a + b \cdot |\dot{\theta}|) \cdot (1 - e^{-v \cdot |\dot{\theta}|}) \quad (7)$$

Where: offset represents the friction coefficient, as it is the friction of Coulomb, *b* is the viscous friction and *V* is the Stribeck. All these parameters can be found in manuals of the manipulators. Table 1 shows these values for the two first joints of a SCARA manipulator.

**Table 1**  
Coefficients of Friction for SCARA robot  
(Sprenger et al., 1997)

Parameters	First Joint	Second Joint
Offset (Nm)	0,3	0,5
a (Nm)	12	5,9
b (Nm s/rad)	6	2,3
V (s/rad)	10	10

Equation (8) describes the dynamic modeling of the robotic manipulator (Asada and the Slotine, 1986).

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta,\dot{\theta})\dot{\theta} + N(\theta,\dot{\theta}) = u \quad (8)$$

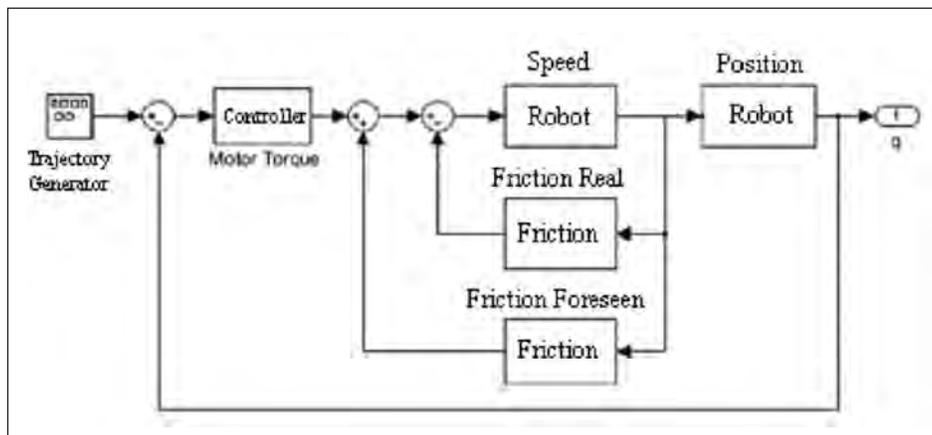
Where:  $\theta$  is the vector of the angles of the joints, *M* is the inertia matrix symmetric and positive, *C*( $\theta, \dot{\theta}$ ) is the vector of the centrifugal and of Coriolis terms,

*N*( $\theta, \dot{\theta}$ ) is the term of the gravitational force and of the force of friction and *u* is the applied force of control.

#### COMPENSATION OF FRICTION

The study of friction control is difficult because friction depends on the machine and the task to be executed (Dupont and Dunlap, 1995). Diverse approaches have been proven to reduce the effect of friction in low speeds such as: derivative of the proportional control of high gain (Dupont, 1994), models based on the signal feedback (Canudas et al. 1995) and impulsive control (Yang, and Tomizuka, 1988). The control strategies try to compensate friction, without the need for control with high profits, and without needing to look at the appropriate model of this friction and then compensate with the real friction. The basic idea is to estimate the instantaneous force (or torque) caused by the friction in order to generate a force of control (or torque) to cancel it. In these cases, the components of the friction are estimated using a friction model that will be added to the law of control. This model can be obtained off-line, as in Gomes, 1995 and Sprenger et al., 1997, or through an adaptive control, Canudas et al., 1991 and 1997.

The project of control applied for compensation of friction in robotic joints is shown in figure 11 (Garcia et. al., 2002).



**Figure 11.** Project of the Control of the System of Compensation of Friction (Garcia et. al., 2002).

## CONCLUSION

This work shows how the performance of a robotic manipulator (from the point of view of the trajectory) can be improved through the inclusion of a physical model based on the friction of rolling joints. This type of friction is very difficult to be evaluated, but some techniques, already used in different works of research, are able to improve systems of control which compensate its influence in the robotic manipulators.

Other phenomena associated with the friction of rolling, such as the superficial temperature and the stick-slip effect, must be kept in consideration in the studies of friction in the robotic joints.

The advantages of this kind of study are: a bigger precision in the position and movement of the robotic manipulator and the minimization of joints wear.

## REFERENCES

- Armstrong-Hélouvry, B., P. Dupont and C. Canudas de Wit. "A survey of analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction", *Automatic*, Vol. 30, pp. 1083-1138.
- Asada, H. and Slotine, J.E. *Robot Analysis and Control*, New York: John Wiley and Sons, 1986.
- C. Canudas De Wit, Noel, P., Aubin, A. And Brogliato, B. "Adaptive friction compensation in robot manipulators: Low velocities", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 10, No. 3, pp. 189-199.
- C. Canudas De Wit, Olsson, H., Aström, K. J. and Lischinsky, P., 1995, "A new model for control of systems with friction", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425.

C. Canudas, De Wit, Lischinsky, P. "Adaptive friction compensation with partially knowing of model", *International Journal of Adaptive Control*, Vol. 11, pp. 65-80.

Dupont, P.E. "Avoiding stick-slip through PD control", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 39, No. 5, pp. 1094-1097.

Dupont, P.E. and Dunlap, E.P. "Friction modeling and PD compensation at very low velocities", *Transactions of the ASME*, Vol. 117, pp. 8-14.

Garcia, A., De Pieri, E. R. and Guenther, R. "Experimental study applied to an industrial robot by using variable structure controllers and friction compensation". *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, Vol. 24, No. 4, pp. 302-308. ISSN 0100-7386.

Gomes, S. C. P. "Modelagem de atritos internos às articulações de robôs manipuladores". Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, Brazil.

Lima, A. S. *Concatenação dos movimentos do manipulador e da câmera de um ROV*. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Rivin, E. I. *Mechanical Design of Robots*. Nueva York: McGraw-Hill, 1987.

Romano, V. F. *Robótica industrial*. Ed. Edgar Blücher, Brasil, 2003.

SKF Rolamentos. "Catálogo de Rolamentos", 05 Dec. 2005, <www.skf.com.br>.

Sprenger, B., Kucera, L. and Mourad, S. "Balancing of an inverted pendulum with a scara robot", IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Tokyo.

Stoeterau, R. L. *Apostila de Tribologia*. UFSC, Brasil, 2004.

Yang, S., and Tomizuka, M. "Adaptive pulse width control for precise positioning under the influence of striction and coulomb friction". *ASME Journal of Dynamics System Measurement and Control*, Vol. 110, pp. 221-227.

## RESPONSIBILITY NOTICE

Only the authors are responsible for the material printed in this paper.



# La computación grid y su aplicación en sistemas que descubren conocimiento

DEYANIRA DÍAZ DÍAZ

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
deyaniradiazdiaz@gmail.com

JOSÉ NELSON PÉREZ CASTILLO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
jnperezcc@gmail.com

Artículo recibido: 5/12/2007  
Evaluación par interno: 1/02/2008  
Aprobado: 13/03/2008

## Resumen

En el presente artículo se describen los elementos fundamentales de la computación grid, que actualmente sobresale por ser una tecnología innovadora, la cual permite compartir de forma coordinada recursos de cómputo. Además, se especifica el papel de la tecnología de los servicios web, como base de los servicios grid, y se analiza la aplicación de la computación grid en sistemas que incluyen el descubrimiento del conocimiento.

**Palabras clave:** computación grid, servicio web, servicio grid, descubrimiento del conocimiento.

## Abstract

This paper describes the main elements of the Grid Computation, an actually outstanding innovative technology, which allows to share in a coordinate way computing resources. Besides, we specify the technology of Web Services, as a base to the Grid Services and we analyze the application of the Grid Computation in systems including the knowledge discovery.

**Keywords:** Grid Computing, Web Service, Grid Service, Knowledge Discovery.

## INTRODUCCIÓN

Cada día la computación grid tiene mayor acogida en las comunidades investigativa, industrial, comercial y gubernamental, debido a la posibilidad de implementar gran variedad de aplicaciones en la ciencia, la tecnología y el descubrimiento del conocimiento [1].

Se describe la computación grid como un conjunto de tecnologías que habilitan y obtienen el beneficio de compartir recursos distribuidos de almacenamiento, procesamiento, aplicaciones y datos entre organizaciones virtuales [2], las cuales son entes independientes que comparten recursos computacionales para lograr un objetivo común.

El objetivo de la computación grid es análogo al de una red eléctrica: “Una red que de forma transparente nos proporciona la potencia necesaria mediante recursos distribuidos” [3].

La computación grid se basa en el aprovechamiento de los ciclos de procesamiento no utilizados por los millones de computadores conectados a la red; de esta forma se logra realizar tareas demasiado intensivas para ser resueltas por una única máquina.

Se destaca que los avances tecnológicos de redes y el uso de la inteligencia artificial proporcionan a la investigación un escenario sin precedentes, permitiendo el acceso a información almacenada en computadores conectados a Internet. Esto revoluciona los negocios, la investigación científica, el gobierno y los servicios alrededor del mundo. Las nuevas aplicaciones requieren una plataforma de red que permita adaptar inteligentemente el desarrollo, el despliegue, la interacción y la administración de los servicios distribuidos globalmente, basados en estándares abiertos, como el Lenguaje Descriptivo de Servicios Web (WSDL) [4].

Entre los avances de las Nuevas Tecnologías, la computación grid es un tema actual que se seguirá desarrollando en los próximos años, debido a su objetivo primordial que consiste en compartir potencia computacional [5].

A continuación se describen los conceptos de computación grid, servicio web y servicio grid.

## COMPUTACIÓN GRID

La computación grid está orientada a compartir, administrar, coordinar y controlar recursos computacionales distribuidos geográficamente, como máquinas, redes,

discos duros, procesadores y datos de cualquier dispositivo digital que forme parte de una grid [4].

En la computación grid, no todos los recursos propios de una organización participante son compartidos en la organización virtual [7].

Existen varios proyectos grid en el mundo, sobre todo en grandes organizaciones de Europa y Estados Unidos [8].

Actualmente la computación grid ha establecido un nuevo paradigma para entregar información, recursos y servicios a los usuarios. Las implementaciones actuales abarcan diversas aplicaciones en la industria y los centros de investigación. En este creciente mundo de interconexiones, pueden distinguirse tres categorías: la grid de información, la de recursos y la de servicios [6].

Para impulsar el desarrollo de la computación grid, Colombia cuenta con la Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada, RENATA, que conectará las universidades y los centros de investigación del país entre sí, y a estos, a través de la Red CLARA, con las redes internacionales de alta velocidad y los centros de investigación más desarrollados del mundo [9]. También está en proceso de formación una organización llamada Grid Colombia [10], que apoya esta causa en los campos regional y nacional.

## SERVICIO WEB

Un servicio web es un componente de software al que pueden acceder desde la web otras aplicaciones en ambientes distribuidos. Permite la creación de programas, basándose en el modelo cliente-servidor, mediante una plataforma independiente del lenguaje y utilizando protocolos abiertos como HTTP (Protocolo de Transferencia de Hipertexto).

Los servicios web usan el Protocolo de Acceso a Objetos Simples (SOAP) [11] para el manejo de mensajes, y la gramática, XML (Lenguaje de Etiquetado Extensible), para comunicarse. Además, se identifican por una dirección localizadora uniforme de recursos (URL) [12].

También existe un estándar básico de los servicios web, el UDDI (Universal Description, Discovery and Integration) [13], cuyo objetivo es registrar en un catálogo los servicios que se ofrecen en diversos lugares del mundo para luego permitir su integra-

ción. En los documentos WSDL [14], se describen los requisitos y los formatos del mensaje solicitado para interactuar con los servicios web del catálogo de registros UDDI.

Los servicios web definen una técnica para describir componentes de software a los que puede accederse, métodos para acceder a estos componentes, y métodos de descubrimiento que habilitan la identificación de proveedores de servicios relevantes [15].

## SERVICIO GRID

Gracias a la convergencia entre computación grid y servicios web, surgen los servicios grid. Estos se fundamentan en los servicios web y cuentan con las siguientes características:

- Memoria de estado: persistencia.
- Servicios potencialmente transitorios.
- Notificaciones de eventos.
- Datos de servicio para dar a conocer su estado interno.
- Extensión de la interfaz [16].

Las tecnologías de la grid están evolucionando hacia una Arquitectura de Servicios de Grid Abierta (OGSA), que consiste en un conjunto extensible de servicios que las organizaciones virtuales pueden agregar de varias maneras [17].

OGSA representa los servicios grid, conformados por un conjunto de convenciones expresadas que usan WSDL [17] para cada propósito, como la administración de tiempo de vida, el descubrimiento de características y la notificación [15]. Además, OGSA provee estándares necesarios para construir servicios grid y está siendo desarrollado por el Global Grid Forum [18].

El Global Grid Forum ha enfocado las investigaciones en el proyecto Globus, que desarrolla un mecanismo básico y la infraestructura para la grid, cuyo resultado es la plataforma Globus Toolkit, que incluye aplicaciones y librerías para gestionar, descubrir y monitorear recursos. Además, permite la gestión de ficheros y define un modelo de seguridad totalmente integrado con el resto de componentes [19].

Para la implementación de servicios grid pueden utilizarse entornos grid estándar como Globus ToolKit [20], GLite [21], UNICORE [22], entre otros.

## APLICACIÓN DE LA COMPUTACIÓN GRID EN SISTEMAS QUE DESCUBREN CONOCIMIENTO

La fase de diseño del descubrimiento del conocimiento es el proceso de seleccionar conjuntos de datos, algoritmos y configuraciones relacionadas para realizar los pasos necesarios que llevan a la extracción de conocimiento desde los datos. El diseño de la aplicación es un proceso fundamental que posibilita aprovechar los medios ofrecidos por el ambiente grid [26].

El proceso de descubrimiento de conocimiento incluye los mecanismos para evaluar la exactitud y la utilidad de los datos procesados, mientras desarrolla una comprensión compartida de la información y filtra el conocimiento para ser guardado en memoria organizacional accesible que frecuentemente es distribuida [27].

Los esfuerzos para automatizar el proceso de extracción del conocimiento empezaron en los años ochenta, con los sistemas expertos. Hoy en día, principalmente en el campo de la inteligencia artificial, se usan las reglas de inducción, las redes neuronales [28], las redes Bayesianas y los algoritmos genéticos, entre otros.

Una herramienta útil para el descubrimiento del conocimiento son las redes neuronales artificiales, ya que tienen una capacidad de descubrimiento no lineal y, potencialmente, utilizan información y bases de datos de conocimiento. Dado un conjunto de datos de entradas-salidas, una red neuronal convencional puede ser entrenada. El entrenamiento con ajuste de pesos numérico asigna conocimiento potencial en el aprendizaje entre datos de entrada y salida. Las redes neuronales son capaces de aplicar el descubrimiento del conocimiento para predecir nuevos datos de salida a partir de nuevos datos de entrada [29].

Es favorable que las nuevas implementaciones en computación grid incluyan descubrimiento del conocimiento y funcionalidades inteligentes de gestión de recursos y servicios, puesto que los principales problemas a que se ven enfrentadas son la coordinación y explotación de la cantidad de datos producidos por las aplicaciones.

La forma en que los datos y la información disponible en los diferentes niveles de la grid pueden ser efectivamente adquiridos, representados, intercambiados, integrados y convertidos en conocimiento útil es un campo de la investigación, llamado grid inteligente [23].

Para la solución de problemas, la grid de conocimiento debe integrar dinámicamente la demanda de servicios grid proporcionados, mediante la Arquitectura Orientada a Servicios (SOA) [24].

La grid de conocimiento es una arquitectura distribuida, basada en la computación grid y en servicios que permiten el desarrollo y la utilización de la aplicación de descubrimiento de conocimiento.

La implementación de la grid de conocimiento consta de servicios grid básicos, servicios de análisis de datos, servicios grid de conocimiento y aplicaciones de bases de datos de descubrimiento del conocimiento (KDD).

Gran cantidad de información se guarda actualmente en los repositorios de datos digitales. Para separar estos datos, los científicos de la computación diseñaron las técnicas de software y herramientas que pueden analizar los datos para encontrar patrones útiles, contribuyendo al llamado descubrimiento del conocimiento en los procesos de las bases de datos (KDD). En particular, la minería de datos es el componente básico del proceso KDD para el hallazgo semiautomático de patrones, asociaciones, cambios, anomalías, eventos y, semánticamente, las estructuras significantes en los datos. Ejemplos típicos de las tareas de minería de datos son la clasificación de los datos, los eventos y predicción de valores, la asociación de las reglas de descubrimiento, y detección de episodios [25].

La arquitectura de la grid de conocimiento está compuesta de un conjunto de servicios divididos en dos capas:

1. La capa central K-Grid, que une los servicios con la plataforma grid y está compuesta por Servicio de Directorio de Conocimiento (KDS), Servicio de Administración de la Ejecución y Localización de los Recursos (RAEMS).
2. La capa de alto nivel K-Grid, que une al usuario ofreciendo un conjunto de servicios para el diseño y ejecución de aplicaciones de Descubrimiento de Conocimiento. Se compone de Servicio de Acceso a Datos (DAS), Servicio de Acceso a los Algoritmos y Herramientas (TAAS), Servicio de Administración del Plan de Ejecución (EPMS) y el Servicio de Presentación de Resultados (RPS) [1] [25].

Entre las aplicaciones de computación grid en sistemas que descubren conocimiento, resalta la Grid de Conocimiento Espacial, puesto que involucra el manejo de grandes cantidades de colecciones de datos espaciales a través de un ambiente distribuido geográficamente. En un gran entorno inteligente y dinámico, los servicios de la red, así como los de descubrimiento, se descentralizan para evitar los cuellos de botella en un punto y en mayor escala. En este ambiente se requiere un mecanismo de descubrimiento, llamado sistema autónomo de área, para localizar recursos espaciales específicos, información, aplicaciones o usuarios involucrados con el entorno grid de conocimiento espacial. El descubrimiento del conocimiento es la extracción del conocimiento implícito, relaciones espaciales y descubrimiento de características y patrones de interés que no son representados en los recursos de datos espaciales [30].

## CONCLUSIONES

De la convergencia entre computación grid y servicios web surge el desarrollo de los servicios grid, los cuales, además de las características de los servicios web, manejan persistencia y notificación de eventos.

La grid de conocimiento es una aplicación de tecnología de la grid para ayudar en el problema de descubrir conocimiento.

La grid de conocimiento utiliza los servicios grid básicos y define un conjunto de capas adicionales para implementar los servicios de descubrimiento de conocimiento distribuido [25].

En Colombia la computación grid está en plena evolución, lo cual es una ventaja para contribuir en su desarrollo. Se propone la implementación de soluciones que integren varias de estas tecnologías que permitan el descubrimiento de conocimiento.

## REFERENCIAS

- [1] A. Congiusta, C. Mastroianni, A. Pugliese, D. Talia, and P. Trunfio. "Enabling Knowledge Discovery Services on Grids", *AxGrids 2004*, 2004, pp. 250-259.
- [2] B. Borja-Sotomayor, "Introducción a la Computación Grid," *Semana ESIDE*, University of Deusto (Bilbao, Spain), April 30, 2004.
- [3] J. Marco. *GRIDs*, Instituto de Física de Cantabria (IFCA) CSIC. *GT RedIRIS*, 2001.
- [4] H. Zhuge. "The Future Interconnection Environment", *IEEE*

- Computer Society, April 2005.
- [5] V. Berstis. "Fundamentals of GRID Computing," IBM, USA., 2002.
- [6] J. Garcia, "Grid," *E.T.S.I. Telecomunicación-Departamento Ingeniería Sistemas Telemáticos*. Ciudad Universitaria s/n 28040. Madrid.
- [7] Borja-Sotomayor and L. Childers. "Globus® Toolkit 4: Programming Java Services," *Morgan Kaufmann Publishers*, December 2005.
- [8] CERN. "Grid @ CERN," *Openlab for DataGrid applications*, Available at: <http://GRIDcafe.web.cern.ch/GRIDcafe/demos/GRID-beginners.ppt>
- [9] "Red Nacional Académica de Tecnología Avanzada Colombia," <http://www.renata.edu.co/>
- [10] "Grid Colombia," in <http://urania.udea.edu.co/grid-colombia/index.php>, 2006.
- [11] M. Gudgin, M. Hadley, J.-J. Moreau, and H. F. Nielsen. "SOAP Version 1.2," in *W3C*, July 2001.
- [12] Wikipedia-contributors. "Web Service," in *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, September 26, 2007 06:54 UTC. Available at: [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Web\\_service&oldid=160419806](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Web_service&oldid=160419806).
- [13] W. T. Tsai, R. Paul, Z. Cao, L. Yu, and A. Saimi. "Verification of Web services using an enhanced UDDI server," in *Department of Computer Science and Engineering, Arizona State University Tempe, USA*. IEEE, 2003.
- [14] E. Christensen, F. Curbena, G. Meredith, and S. Weerawarana. "Web Services Description Language (WSDL) 1.1," in *W3C*. [www.w3.org/TR/wsdl](http://www.w3.org/TR/wsdl), 15 March 2001.
- [15] I. Foster, C. Kesselman, J. Nick, and S. Tuecke. "The Physiology of the Grid: An Open Grid Services Architecture for Distributed Systems Integration," in *Open Grid Service Infrastructure WG, Global Grid Forum*, June 22, 2002. Available at: <http://www.globus.org/alliance/publications/papers/ogsa.pdf>
- [16] S. Tuecke, K. Czajkowski, I. Foster, J. Frey, S. Graham, C. Kesselman, T. Maquire, T. Sandholm, D. Snelling, and P. Vanderbilt. "Open Grid Services Infrastructure (OGSI)," in *GLOBAL GRID FORUM*, 2003.
- [17] D. Talia. "The Open Grid Services Architecture: Where the Grid Meets the Web," in *IEEE Internet Computing*, vol. 6, 2002, pp. 67-71.
- [18] *The Global GRID Forum*. <http://www.ggf.org>, 2007.
- [19] "Globus Toolkit," in *Globus Alliance*. <http://www.globus.org>. 2007.
- [20] I. Foster and C. Kesselman. "Globus: A Metacomputing Infrastructure Toolkit," in *Information and Communications University*, 2001.
- [21] E. Laure, S. M. Fisher, A. Frohner, C. Grandi, P. Kunszt, A. Krenek, O. Mulmo, F. Pacini, F. Prelz, J. White, M. Barroso, P. Buncic, F. Hemmer, A. D. Meglio, and A. Edlund. "Programming the Grid with gLite," in *Computational Methods in Science and Technology*, 2006, pp. 33-35.
- [22] D. W. Erwin and D. F. Snelling. "UNICORE: A Grid Computing Environment " in *Proceedings of the 7th International Euro-Par Conference Manchester on Parallel Processing 2001* pp. 825-834.
- [23] M. Cannataro. "Knowledge Discovery and Ontology-based services on the Grid," in *University "Magna Græcia" of Catanzaro*, 2003.
- [24] "Service-oriented architecture (SOA) definition ". [http://www.service-architecture.com/web-services/articles/service-oriented\\_architecture\\_soa\\_definition.html](http://www.service-architecture.com/web-services/articles/service-oriented_architecture_soa_definition.html)
- [25] M. Cannataro and D. Talia. "The Knowledge Grid," in *Communications of the ACM*, vol. 46, January 2003.
- [26] E. Cesario, A. Congiusta, D. Talia, and P. Trunfio, "Designing data analysis services in the Knowledge Grid," in *CoreGRID*, 2007.
- [27] G. Bueti, A. Congiusta, and D. Talia. "Developing Distributed Data Mining Applications in the KNOWLEDGE GRID Framework," in *VECPAR 2004*, 2005, pp. 156 – 169.
- [28] S. Haykin. "Neural Networks: A Comprehensive Foundation," pp. 768, 1994.
- [29] Y. Zhang, M. D. Fraser, and A. Kandel. "Granular Neural Networks for Numerical-Linguistic Data Fusion and Knowledge Discovery," *IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS*, vol. 11. NO. 3., Mayo 2000.
- [30] G. Xiaosan and B. Fuling. "SKG: Spatial Knowledge Discovery in Grid Environment," in *Proceedings of the First International Conference on Innovative Computing, Information and Control - Volume 2* %@ 0-7695-2616-0: IEEE Computer Society, 2006, pp. 67-70.



ADMINISTRACIÓN

# Perspectivas sociológica y económica en la teoría organizacional

(1a. parte)

ALEXÁNDER GUZMÁN VÁSQUEZ

Magíster en administración, administrador de empresas. Estudiante del Doctorado en Administración, Facultad de Administración, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Correo: ale-guzm@uniandes.edu.co

MARÍA ANDREA TRUJILLO DÁVILA

Magíster en administración, ingeniera sanitaria. Profesora e investigadora. Facultad de Administración, Universidad del Rosario. Estudiante del Doctorado en Administración, Facultad de Administración, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Correo: maria.trujilloda@urosario.edu.co

GISELE EUGENIA BECERRA PLAZA

Magíster en administración, administradora de empresas. Decana, Facultad de Administración, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia. Correo: gbecerra@escuelaing.edu.co

MANUELA TRUJILLO DÁVILA

Contadora pública. Sales Manager. Insurance Express. Correo: mtrujild@une.net.co

Artículo recibido: 5/12/2007  
Evaluación par interno: 1/02/2008  
Aprobado: 13/03/2008

## Abstract

This article pretends to remark the importance of sociological and economical perspectives in the construction of the organizational theory. It affirms that sociological perspective has allowed understanding the complexity of the organization in a better way, its interaction with the society and the importance of organizational culture aspects. On the other hand, the economical perspective provides tools for management decision-making. Under sociological perspective let analyzing networks' approach, in contrast, under economical perspective let analyzing contractility's approach and consider investigation questions regarding with those approaches.

**Key words:** Organizational Theory. Sociology. Economy.

## Resumen

Este artículo pretende resaltar la importancia de las perspectivas sociológica y económica en la construcción del conocimiento en la teoría organizacional. Afirma que la perspectiva sociológica ha permitido entender de mejor manera la complejidad de la organización, su interacción con la sociedad y la importancia de aspectos culturales organizacionales. La perspectiva económica provee herramientas para la toma de decisiones gerenciales. Desde la perspectiva sociológica se analiza el enfoque de redes y desde la perspectiva económica, el enfoque contractualista. Se plantean preguntas de investigación relacionadas con estos enfoques.

**Palabras clave:** teoría organizacional, sociología, economía.

## INTRODUCCIÓN

El avance más significativo en la construcción del conocimiento de la administración se ha logrado en la teoría organizacional, gracias a los aportes de la sociología y la economía. Desde la sociología, Lammers (1981) argumenta que los aportes a la teoría organizacional pueden sintetizarse en tres aspectos. El primero postula que las organizaciones son herramientas recalcitrantes. Para los sociólogos las organizaciones tienen vida propia, por lo que toman distancia de la visión clásica de la teoría organizacional, en la cual las organizaciones son instrumentos simples, medios neutrales que pueden ser direccionados de manera racional para alcanzar ciertos fines. Los problemas de poder y conflicto, sumados al diseño desafiante de formas organizacionales, hacen de la organización una herramienta no tan simple como inicialmente fue planteada por el enfoque mecanicista. El segundo aporte de la sociología a la teoría organizacional afirma que las organizaciones son partes integrantes de la sociedad. Los padres de la sociología de las organizaciones, entre ellos Max Weber, se enfocaron en la interacción generada entre las organizaciones y la sociedad. El tercer aporte es el interés en los aspectos culturales y los determinantes de las formas y los procesos organizacionales. El análisis de la naturaleza de la autoridad y su legitimación, reglas y roles, valores y normas, sistemas de creencias y símbolos usualmente caen dentro de la sociología.

Para los economistas, la toma de decisiones y los problemas que deben solucionarse en las empresas requieren el uso importante de un conjunto de herramientas económicas. El desarrollo de sistemas de evaluación del desempeño y de sistemas de compensación puede realizarse a través de herramientas proporcionadas por la microeconomía (Brickley, Smith y Zimmerman, 1999).

El enfoque contractualista o teoría de contratos, dentro del cual se pueden resaltar la teoría de los costos de transacción y la teoría de la agencia, representa aportes propios o influenciados por la economía en la teoría organizacional. La teoría de los costos de transacción estudia la relación entre la organización y el mercado, analizando cómo se constituyen las firmas en mecanismos alternos al mercado que permiten organizar de manera más eficiente actividades productivas y reducir los costos de transacción. La teoría de la agencia resalta los problemas que se presentan entre el principal y el

agente debido a la información asimétrica, y busca el diseño de contratos óptimos que permitan disminuir los efectos nocivos de dicha información asimétrica sobre los resultados esperados por las contrapartes de un contrato.

Un aporte de los economistas a la teoría organizacional está en la corriente teórica inspirada por Edith Penrose (1959). Su teoría del crecimiento de la firma es considerada un trabajo seminal que provee fundamentos intelectuales para la moderna teoría de los recursos y las capacidades, desde la cual se concibe a la empresa como un conjunto de recursos que permiten obtener diferenciación frente a los competidores, dadas las configuraciones y las características de estos recursos. Esta teoría se encuentra en desarrollo y proceso de maduración. Una muestra de ello es la falta de claridad en las definiciones de conceptos clave como recursos, competencias *core*, *capabilities* y *dynamic capabilities*. Estos conceptos permanecen ambiguos y controversiales, lo cual ha permitido el surgimiento de innumerables trabajos teóricos y empíricos.

Las dos perspectivas mencionadas –sociológica y económica– se reconocen mutuamente en la actualidad, generando una perspectiva promisoría para la construcción del conocimiento en el campo de la administración, y específicamente en la teoría organizacional.

Este artículo pretende resaltar, dentro de la perspectiva sociológica, el enfoque de redes, en el que se enfatiza en el efecto de la estructura social sobre la vida económica; y dentro de la perspectiva económica, el enfoque de la teoría de contratos para el estudio de las organizaciones, en el cual la organización es concebida como un *nexus* de contratos. Con ello se busca plantear algunas preguntas de investigación desde cada perspectiva, poniendo en evidencia cómo los aportes teóricos realizados por estas disciplinas alimentan inquietudes intelectuales que permiten avanzar en el entendimiento de las organizaciones.

## REDES Y ORGANIZACIONES. PERSPECTIVA SOCIOLOGICA

El reconocimiento del efecto que puede tener la estructura social en la vida económica es relativamente reciente. Los modelos económicos no han tenido en cuenta la configuración de la estructura social y el impacto que puede tener en los resultados económicos y la

capacidad de adaptación de la organización al entorno. Sin embargo, investigaciones empíricas realizadas en redes organizacionales han mostrado la incidencia de la estructura social en el desempeño económico de las organizaciones, lo cual invita al desarrollo de investigaciones que permitan construir una firme teoría al respecto.

Granovetter (1985) fue el primer autor en plantear que la acción económica está imbricada –*embedded*– en la estructura de las relaciones sociales en la sociedad industrial. El concepto de imbricamiento es tomado por Granovetter de la escuela sustantivista en la antropología, identificada con Karl Polanyi (1957). Este planteamiento teórico ha establecido un puente entre los acercamientos sociológicos y económicos a la teoría organizacional. Granovetter enfatiza en la importancia de la confianza como característica de las relaciones interpersonales realizadas en el contexto de redes organizacionales.

Posteriormente, Zukin y DiMaggio (1990) clasificaron el imbricamiento en cuatro tipos: estructural, cognoscitivo, político y cultural. Los tres últimos están relacionados con perspectivas sociales, mientras que el imbricamiento estructural se ocupa de entender cómo afecta la actividad económica la calidad de las redes de intercambio. Desde el imbricamiento estructural, Uzzi (1997) complementa el trabajo de Granovetter buscando establecer cómo afectan el intercambio económico las relaciones sociales. El trabajo de Uzzi se desarrolló en el sector de ropa en la ciudad de Nueva York, específicamente en veintitrés empresas heterogéneas dedicadas al diseño y comercialización de vestidos para damas. Sus conclusiones amplían significativamente el concepto de imbricamiento y su importancia para la teoría organizacional.

De su estudio se pueden destacar diversos aspectos. Uno de ellos es la categorización de las relaciones en dos tipos. Destaca la existencia de relaciones de mercado, en las cuales la acción de los actores es motivada por su propio interés, se comparte exclusivamente información de precios, las relaciones personales son relajadas y múltiples, y se cambia constantemente de socios comerciales aprovechando oportunidades de mercado y evitando la dependencia. Describe además las relaciones imbricadas, caracterizadas por la confianza y los lazos personales, en las cuales las expectativas son más predecibles y se reducen los costos de supervisión.

El primer tipo de relaciones es más frecuente, aunque menos importante para el éxito empresarial y menos representativo respecto al volumen comercial. Las relaciones imbricadas se caracterizan por la confianza, consolidada gracias a esfuerzos adicionales voluntarios y recíprocos; la transmisión de información detallada, tácita y holística, difícilmente transferible a través de relaciones de mercado; y por acuerdos para la solución de problemas de manera conjunta, que permiten generar una respuesta oportuna al mercado y ajustar la producción de acuerdo con los cambios del entorno.

El imbricamiento de la red de organizaciones representa mejoras trascendentales para las organizaciones en cuatro aspectos: 1) Facilita la economía de tiempo y eficacia en la asignación de recursos. Gracias a la información más detallada de las relaciones imbricadas, en la medida en que la red establece este tipo de relaciones, logra economías de tiempo, cambio oportuno frente a demandas del entorno y eficiencia en la asignación de recursos. 2) Permite el establecimiento de acuerdos integradores. Debido a la limitación de socios de intercambio en el interior de la red, las relaciones imbricadas permiten limitar la búsqueda de oportunidades en el mercado, profundizando la búsqueda de soluciones mutuas para los socios imbricados, facilitando el establecimiento de acuerdos integradores en lugar de acuerdos distributivos (suma cero). 3) Permite mayor inversión y exposición al riesgo de manera mesurada. El conocer los socios comerciales disminuye la incertidumbre de las inversiones y, por tanto, la exposición al riesgo. Además, menos recursos estarán comprometidos en las operaciones entre firmas. 4) Mejora la adaptación compleja y las distribuciones de Pareto. Las relaciones imbricadas a través de las redes mejoran la coordinación y permiten identificar soluciones óptimas que mejoran la posición de ciertos actores sin desmejorar la de otros.

Sin embargo, procesos inherentes al imbricamiento, que mejoran la capacidad adaptativa de las organizaciones, pueden –paradójicamente– reducir la capacidad de adaptación de la empresa. El imbricamiento se convierte en desventaja en tres circunstancias: 1) cuando un integrante de la red abandona sus características core genera efectos negativos en la viabilidad de la red y puede desencadenar un efecto de extinción. 2) Cambios institucionales pueden racionalizar el mercado, afectando los lazos imbricados establecidos y generando problemas para las empresas que basaron sus ventajas competitivas

en esos lazos. 3) Cuando una red está sobreimbricada disminuye su potencial de actuación debido a la falta de ideas innovadoras proveniente de actores externos.

Las desventajas establecidas por Uzzi y relacionadas con redes organizacionales representan un aporte teórico relevante para la administración de estas formas de coordinación. Sin embargo, en la mayoría de estudios empíricos resaltan las fortalezas en la constitución de redes organizacionales. Un ejemplo de esta afirmación es el trabajo de Koput, Powell y Smith-Doerr (1996), realizado con doscientas veinte firmas del sector de biotecnología dedicadas al diagnóstico y terapia en humanos. Estos investigadores buscaron demostrar que ante una amplia distribución del conocimiento y su importancia para el desarrollo de ventajas competitivas, la innovación está soportada en una red organizacional. De acuerdo con Koput y su equipo, ante un régimen de desarrollo tecnológico acelerado, ninguna organización individual desarrolla todas las capacidades internas necesarias para el éxito. Lo anterior justifica la conformación de redes organizacionales que proveen acceso a conocimiento y a recursos que no estarían disponibles en las relaciones tradicionales de mercado. Koput y su equipo resaltan dos hallazgos principales. El primero está relacionado con el crecimiento, reconocido como un proceso que requiere tiempo, pero que solo es posible gracias al establecimiento de relaciones colaborativas. Su segundo descubrimiento resalta la importancia de la posición organizacional en la red por las influencias que la misma conlleva en las alianzas y la capacidad de consecución de recursos.

Otro estudio empírico valioso sobre redes organizacionales es el realizado por Ménard (1996) sobre la industria avícola francesa. El autor estudió las propiedades de las estructuras conocidas como “formas híbridas”, a través de las cuales se establece una dependencia bilateral que no se obtiene en las relaciones tradicionales de mercado, pero que tampoco implican la integración vertical y la creación de una jerarquía. En esta forma organizacional se adquiere una rápida adaptación al entorno y una menor exposición al riesgo, por la dispersión del mismo entre los agentes. El caso mostró la configuración de diferentes relaciones colaborativas entre los agentes económicos que no hubiesen sido posible a través de las relaciones tradicionales en el mercado.

Estos dos casos citados resaltan las ventajas de las redes ignorando su estructural social y su carácter socio-

lógico. Koput menciona tangencialmente la confianza y Ménard la reducción de las conductas basadas en el oportunismo, pero ninguno aborda de manera central las características sociales de las relaciones establecidas entre los actores de la red. Por tanto, un estudio completo de las redes establecidas entre organizaciones necesariamente implica caracterizar los comportamientos de los agentes para entender el soporte social inherente a la red. Estos estudios podrían dar respuesta a las siguientes inquietudes: ¿qué tan determinantes pueden ser los lazos entre individuos en redes de compañías de gran tamaño o redes transnacionales? ¿Cómo se configura la estructura social inmersa en este tipo de redes? ¿Constituyen las empresas colombianas redes organizacionales basadas en la confianza para el desarrollo de sus actividades económicas de manera cooperativa, o las características de sus relaciones se aproximan más a las relaciones de mercado caracterizadas por Uzzi (1997)? ¿De que manera la confianza de las relaciones imbricadas en una red de organizaciones disminuye la asimetría de información y la imperfección de los contratos establecidos entre actores? ¿Los planteamientos teóricos de Granovetter (1985) llevan a que las relaciones comerciales se confundan con las relaciones sociales?

#### ENFOQUE CONTRACTUALISTA O TEORÍA DE CONTRATOS. PERSPECTIVA ECONÓMICA

En esta sección del artículo se presentará la importancia y complejidad del surgimiento de la nueva organización moderna –como organización económica–, señalando sus características y los factores que se han ido involucrando en la configuración actual. Se resaltarán la importancia y las características de los contratos, como mecanismo adoptado por las organizaciones para formalizar las relaciones en el desarrollo de su actividad.

Es bueno considerar que con el surgimiento de la empresa moderna no se reemplazó el mercado como un todo, ya que este sigue siendo el vehículo para el intercambio de bienes y servicios en la economía. Este nuevo tipo de firma ha tomado las funciones de coordinación del flujo de bienes y servicios a través de algunos procesos existentes de producción y distribución (Chandler, 1977). La nueva tarea otorgó gran responsabilidad a la empresa en la distribución eficiente de los recursos, condicionando al directivo a jugar un papel prepon-

derante en la organización. No solo debe preocuparse por administrar los recursos propios o de un tercero —*se introduce el concepto de separación entre propiedad y control*—, sino por movilizar una cantidad de recursos al mercado, y por tanto, al sistema económico de manera eficiente. El planteamiento anterior es similar a lo expuesto por Ronald Coase: fuera de la firma, el movimiento de los precios dirige la producción, la cual está coordinada a través de una serie de transacciones en el mercado. En el interior de la firma, se eliminan estas transacciones de mercado y la estructura compleja de mercado se sustituye por el empresario coordinador, quien dirige la producción. Es claro que este es un medio alternativo de coordinar producción (Coase, 1937: 4).

El propósito de coordinar está centrado en facilitar y estructurar el intercambio de bienes y servicios entre todos los actores económicos al menor costo asociado posible. En ocasiones, dicho intercambio debe estar formalizado, debe poseer características claras en términos de lenguaje y alcance. Lo anterior conlleva el establecimiento de contratos, los cuales imprimen y materializan esas características.

Según Hodgson (1988), en la sociedad capitalista la mayoría de los mercados involucran explícita o implícitamente<sup>1</sup> contratos que incluyen las reglas del juego y establecen las acciones a seguir ante el incumplimiento de alguna de las partes involucradas. Es más, en mercados ilegales, el establecimiento de contratos no es una tarea ajena, ya que en estos también se ejerce la coordinación de múltiples actividades. Las transacciones, en lo que se conoce como el bajo mundo o mercado negro, toman lugar en estructuras de gobierno bien definidas en reglas soportadas por sanciones y acuerdos privados de manera implícita (Turvani, 1997: 131).

Las transacciones inmersas en el intercambio, y por consiguiente en las labores de coordinación, conllevan costos, conocidos como costos de transacción, los cuales están asociados al establecimiento de relaciones, su monitoreo, control y verificación. El establecimiento de contratos, como parte del proceso de coordinación, trae consigo un costo representativo de acuerdo con la teoría de la firma. Ante un mundo impredecible y complejo, el

mecanismo del contrato per se es limitado, al no poder incluir todas las situaciones y contingencias que pueden suceder en una relación entre agentes (racionalidad limitada). Además, ante el supuesto de poder incluir todos los escenarios futuros, se necesitaría un interlocutor válido que comprenda el lenguaje en el cual fue establecido dicho contrato. En otras palabras, se requiere que las partes tengan comunicación no solamente entre ellas, sino con terceros que comprendan el entorno en el cual operan las partes contratantes (Hart, 1995: 25).

Lo anterior ratifica la ambigüedad en la que puede establecerse un contrato, llevando a la firma a establecer *contratos incompletos* debido principalmente a la asimetría de información, lo cual implica renegociaciones y, por consiguiente, incremento de costos. El establecimiento de contratos incompletos trae ciertas implicaciones en la concepción de propiedad y control. Al enfrentarse a la ausencia de información, se busca adquirir derechos residuales que permitan tener capacidad de decisión ante situaciones no previstas en el contrato; este es el dilema entre querer ser dueño y no acreedor.

La evolución de la empresa en la segunda mitad del siglo XX se ha visto reflejada en la transformación de sus características. La empresa tradicional era intensiva en activos físicos, integrada verticalmente, con talento humano reemplazable, control centralizado y límites claros y estables. La firma moderna se caracteriza por unas fronteras en constante flujo y por la importancia del *capital humano*. Esta centra su atención en el individuo. Los recursos físicos de la empresa no representan la fuente principal de valor y mando (Zingales, 2000:1624). Siendo entonces el individuo un recurso único para la empresa, y considerando que la naturaleza humana es compleja y necesita ser reducida a proporciones manejables, se establecen contratos entre el principal y el agente con ciertos incentivos que direccionan la racionalidad limitada y el oportunismo, que buscan minimizar los costos de transacción.

Cuando comienza a ser importante para la empresa el capital intangible y se reconoce la complejidad de establecer contratos que reflejen lo que realmente aporta el individuo a la firma en el cumplimiento de sus obligaciones, resulta complejo concebir la organización como un nexo de contratos. Aun teniendo en cuenta la existencia de los contratos implícitos, estos son incompletos, dada la diferencia que se presenta entre las expectativas de las contrapartes involucradas. La firma

1. De acuerdo con Baker et al. (1999), los contratos implícitos son acuerdos informales soportados más en la reputación que en la ley.

trasciende más allá de lo establecido en los contratos explícitos e implícitos; factores adicionales dan otra dimensión a la organización.

Lo anterior lleva al surgimiento de los siguientes interrogantes: ¿puede la firma, a pesar de la asimetría de información y la imperfección de los contratos, ser concebida como un *nexus* de contratos? ¿Puede la empresa diseñar modelos de intervención que hagan explícito lo que está implícito? ¿Cuál sería el impacto de estos modelos en la toma de decisiones? ¿Son los contratos implícitos una consecuencia de las organizaciones informales? ¿Cuál es la relación entre organizaciones informales y contratos incompletos? ¿Qué relación hay entre propiedad y derechos residuales?

#### COMENTARIO FINAL

En este artículo se ha resaltado la importancia de los aportes de la sociología y la economía a la teoría organizacional. Se ha prestado especial énfasis al enfoque de redes dentro de la perspectiva sociológica, y a la teoría de contratos o enfoque contractualista, dentro de la perspectiva económica. La discusión presentada permitió construir preguntas de investigación dentro del campo de la teoría organizacional, mostrando que estas perspectivas permiten el planteamiento de interrogantes válidos para avanzar en la construcción del conocimiento dentro de la teoría organizacional.

#### REFERENCIAS

Baker, G. & Gibbons R., & Murphy, K. J. *Implicit contracts and the theory of the firm*. Working paper, Harvard Business School, 1999. pp. 881-919.

Brickley, J.; Smith, C. & Zimmerman, J. Teaching the Economics of Organizations. *Financial Practice & Education* [serial online]. Fall/Winter99 1999;9(2):120-124.

Chandler, Alfred Dupont. *The visible hand: the managerial revolution in american business*. Cambridge, Mass. The Belknap Press of Harvard University Press, 1977.

Coase, R. "La naturaleza de la firma". En: *La naturaleza económica de la empresa*. Alianza. Madrid. Traducción del artículo "The Nature of the Firm". *Economica*, 1994 [1937].

Granovetter, M. Economic action and social structure: The problem of embeddedness, *American Journal of Sociology*, 91: 481-510.

Hart, Oliver. Introduction (p. 1-12), Chapter 1 (p. 18-28). En *Firms, Contracts, and Financial Structure*. Oxford, England: Clarendon Press; New York: Oxford University Press, 1995.

Hodgson, Geoffrey. Chapter 8: Markets as Institutions (p. 172 – 194); Chapter 9, Firms and Markets (pp. 195 – 216). En *Economics and Institutions*. Philadelphia: University of Pennsylvania, 1988.

Koput, K. W., Powell, W. W., & Smith-Doerr, L. Interorganizational Collaboration and the Locus of Innovation: Networks of Learning in Biotechnology, *Administrative Science Quarterly*, Vol. 41, 1996 116-145.

Lammers, C. Contributions of Organizational Sociology: Part II: Contributions to Organizational Theory and Practice - A Liberal View. *Organization Studies*. 1981;2(4): 361-376.

Ménard, C. On Clusters, Hybrids and Other Strange Forms: the Case of the French Poultry Industry, *Journal of Institutional and Theoretical Economics*, pp. 1-30.

Penrose, E. T. *The Theory of Growth of the Firm*. London: Basil Blackwell, 1959.

Polanyi, Karl; C. Arensberg and H. Pearson. *Trade and Market in the Early Empires*. New York: Free Press, 1957.

Turvani, Margherita. Illegal markets and new institutional economics (pp. 127-148). En *Transaction Cost Economics: Recent Developments*. Claude Ménard (ed.), 1997.

Uzzi, B. Social structure and competition in interfirm networks: The paradox of embeddedness. *Administrative Science Quarterly*, 42: 35-67.

Zingales, L. In Search of New Foundations. *Journal of Finance*. Volume XV No. 4: 1623-1653.

Zukin, Sharon y DiMaggio. *Structures of Capital: The Social Organization of the Economy*. New York: Cambridge University Press, 1990.

# Búsqueda tabú para el 2-agente viajero peripatético<sup>1</sup>

CARLOS LEONARDO QUINTERO ARAÚJO

Ingeniero industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. Especialista en Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. M.Sc. en Optimización y Seguridad de Sistemas en la Universidad de Tecnología de Troyes, Francia. Actualmente se desempeña como director del Centro de Estudios de Optimización de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.  
cquinter@escuelaing.edu.co

Artículo recibido: 7/2/2008  
Evaluación par interno: 20/02/2008  
Aprobado: 13/03/2008

## Resumen

Dado un grafo completo, el problema del  $m$ -agente viajero peripatético consiste en determinar  $m$  rutas hamiltonianas sin arcos en común entre ellas, garantizando un costo total mínimo. Este problema se aplica, por ejemplo, en actividades como la guardia nocturna, el transporte de valores, las rutas de monitoreo a entidades financieras y el diseño de redes, en las cuales es indispensable tener distintas configuraciones (rutas) que permitan reforzar la seguridad de dichas actividades. En el presente trabajo, se utiliza una metaheurística de tipo búsqueda tabú para resolver el problema en el caso  $m = 2$ , y se comparan los resultados obtenidos a la luz de diferentes criterios de evaluación.

**Palabras clave:** búsqueda tabú, metaheurísticas, problemas de ruteo.

## Abstract

Given a complete graph, the  $m$ -peripatetic salesman problem consists in determine  $m$  edge disjoint hamiltonian cycles of minimum total cost. Applications for this problem include the design of watchman tours, high value transportation, network design, etc., in wich it is important to assign a set of edge-disjoint rounds in order to avoid repetitive routes and thus enhance the security for these activities. In this work, a Tabu Search based metaheuristic is proposed to solve the problem where  $m = 2$ . The results are compared under different evaluation criteria.

## INTRODUCCIÓN

Dado un grafo completo, el problema del  $m$ -agente viajero peripatético consiste en establecer  $m$  rutas hamiltonianas<sup>2</sup> sin ningún arco en común con el costo mínimo total. Aplicaciones para este problema se encuentran en la búsqueda de una solución para el problema de las empresas de vigilancia nocturna. Este problema consiste básicamente en repartir una serie de edificios que debe vigilar un grupo de guardias, quienes deben garantizar la seguridad durante la noche. Una vez que cada guardia es asignado a un conjunto de edificios (los edificios representan los nodos del grafo y los caminos entre estos representan los arcos), debe utilizar distintas rutas cada noche para garantizar la seguridad. Otras aplicaciones de este problema son el diseño de rutas para las empresas de transporte de

1. Una versión preliminar de este documento fue presentada en la Sexta Conferencia Francófona de Modelaje Matemático y Simulación, MOSIM'06, llevada a cabo en Rabat (Marruecos), con el título Développement de Méthodes Heuristiques pour le 2-Voyageur de Commerce Péripatétique [9].
2. Ruta que pasa por todos los nodos, visitando cada nodo del grafo una sola vez.

valores, el monitoreo de entidades bancarias y el diseño de redes de computadores en los cuales se requieren distintas configuraciones para que sean menos vulnerables las actividades desarrolladas.

El objetivo de este estudio es construir métodos heurísticos (aproximados) para resolver el problema en el caso de  $m = 2$  y comparar sus resultados a la luz de diversos criterios de evaluación. Para desarrollar la primera solución factible se utilizó una heurística constructiva basada en el algoritmo del vecino más próximo. De inmediato se procedió al mejoramiento de la solución con una metaheurística de tipo búsqueda tabú [1], que utilizó los intercambios k-opt propuestos por Lin y Kernighan [2], utilizando 2 y 3 como los valores de  $k$ . Adicionalmente, se propone una heurística que evalúa a priori los beneficios obtenidos al ejecutar los intercambios 2-opt y 3-opt, y que ejecuta en cada iteración la de mayores beneficios.

En la primera parte, se presenta el marco teórico; en la segunda, se muestra la descripción y la formulación del problema junto a un resumen de los trabajos previamente realizados; en la tercera, se encuentra el método utilizado en este estudio y, por último, las conclusiones y perspectivas.

## GENERALIDADES Y MARCO TEÓRICO

### Problemas de ruteo

En los problemas de ruteo, un vehículo debe visitar de manera óptima una serie de sitios (tareas). Entre las principales aplicaciones de este tipo de problemas se encuentran las rutas de colecta o de entrega de productos, de mantenimiento y de inspección, el montaje de componentes electrónicos, etc. El objetivo de un problema de ruteo es encontrar un conjunto de rutas en las cuales se visiten todos los sitios con el costo total mínimo.

Los problemas de ruteo se dividen en problemas de ruteo en nodos y problemas de ruteo en arcos. Los más conocidos son el problema del agente viajero (Traveling Salesman Problem), el problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem), el problema del cartero chino, el problema de ruteo capacitado sobre arcos (Capacitated Arc Routing Problem), entre otros.

### Complejidad

La complejidad de un algoritmo se mide por el número de operaciones elementales que se deben realizar en el peor de los casos. Dicho de otra manera, un algoritmo es de orden  $n$   $O(n)$  si, en el peor de los casos, un múltiplo de  $n$  operaciones elementales debe ser ejecutado por el algoritmo.

Una de las maneras de clasificar los problemas de optimización es en función de su complejidad (problemas fáciles y difíciles). El interés principal de establecer esta clasificación es determinar si para un problema dado se puede encontrar una solución exacta en un tiempo razonable o si la búsqueda de una solución aproximada (no óptima) es interesante o no. Se dice que un problema de optimización es NP-difícil si no hay algoritmos polinomiales para resolverlo de manera óptima. Un algoritmo es polinomial si su complejidad se puede expresar como un polinomio de los datos de entrada del problema.

### Métodos exactos

Al tratar de encontrar soluciones para los problemas difíciles, lo más frecuente es desarrollar métodos heurísticos (aproximados), pero en algunos casos puede ser útil conocer soluciones exactas, sobre todo para evaluar el desempeño de las heurísticas propuestas.

Los algoritmos que pueden desarrollarse para los problemas difíciles son, en la mayoría de los casos, algoritmos exponenciales, los cuales solo se podrán utilizar para resolver instancias de tamaño relativamente pequeño; pero, para algunos problemas, dicho tamaño no corresponde al de aplicaciones de la realidad.

Algunos de los métodos exactos que se conocen son Ramificación y acotamiento (Branch and Bound), Ramificación y corte (Branch and Cut) y Generación de columnas (Column Generation).

### Métodos heurísticos

La mayoría de los problemas de ruteo son NP-difíciles, lo que obliga a utilizar métodos aproximados o heurísticos. Una heurística es un algoritmo que permite calcular rápidamente una solución adecuada para un problema de optimización, la cual no da garantía de optimalidad.

Para evaluar la calidad de la solución de una heurística para una instancia cualquiera ( $I$ ) de un problema, se puede utilizar el cociente entre el costo encontrado por la heurística ( $H(I)$ ) y el costo óptimo ( $O(I)$ ). Este cociente se conoce como desempeño relativo de la heurística y se denota por

$$DR = \frac{H(I)}{O(I)}$$

Generalmente, el costo óptimo no se conoce, pero sí una cota inferior<sup>3</sup> para el problema ( $LB(I)$ ). Dado que  $LB(I) \leq O(I)$ , se

$$DR \leq \frac{H(I)}{LB(I)}$$

tiene que. También se pueden utilizar otros criterios de evaluación, como el promedio de los errores con respecto al óptimo (o a la cota inferior), el error tipo de los errores, el error máximo, etc.

### Cota inferior

Uno de los mecanismos para evaluar la calidad del resultado de una heurística para una instancia particular de un problema es la relación existente entre el costo de la solución de la heurística y el costo óptimo. Con frecuencia, para los problemas de la vida real, el costo óptimo es desconocido, lo que obliga a trabajar con una cota inferior del problema.

El resultado obtenido para la relajación de un problema, en el caso de minimización, es una cota inferior de la solución óptima. Una relajación de un problema de optimización es otro problema de optimización en el cual el conjunto de soluciones factibles contiene todas las soluciones factibles del problema original y en el cual el valor de la función objetivo es inferior o igual al valor de la función objetivo original. De esta manera, se reemplaza el problema inicial por otro problema con una región factible más grande, el cual puede resolverse con más facilidad. Esta relajación se refina constantemente con el objeto de limitar la región factible para que se acerque con la mayor fidelidad posible al problema original.

3. Ver numeral 2.5 del presente documento.

## DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### Estado del arte

Dado un grafo completo  $G=(V, E)$ , donde  $V = \{1, \dots, n\}$  es el conjunto de nodos y  $E = \{e_{ij}; i, j \in V, i \neq j\}$  es el conjunto de arcos, para cada arco  $(i, j)$  se asocia un costo  $C_{ij}$ . El 2-agente viajero peripatético consiste en determinar dos ciclos hamiltonianos que no posean ningún arco en común de costo total mínimo sobre  $G$ ; este es un caso particular del  $m$ -PSP ( $m$ -Peripatetic Salesman Problem) presentado inicialmente en [3]

En [3] se presenta la heurística de Krarup para el 2-PSP: resolver el primer TSP<sup>4</sup> sobre  $G$  y prohibir la utilización de todos los arcos que forman parte de la solución; resolver el segundo TSP sobre el nuevo gráfico para obtener dos ciclos hamiltonianos sin arcos en común. Ya se ha probado que aun si los dos TSP son resueltos de manera óptima, la solución global no necesariamente lo es [4].

En [4] se proponen algoritmos para el 2-PSP euclidiano y para el 2-PSP con distancias 1 y 2. En [5] se proponen algoritmos exactos de tipo ramificación y corte para el  $m$ -PSP no orientado, los cuales pudieron resolver instancias con  $m = 5$  y  $n = 60$ .

### Formulación del problema y cota inferior<sup>5</sup>

Sea  $X_{ijk}$  una variable binaria igual a 1 si el arco  $(i, j)$  pertenece a la  $k$ -ésima ruta y es igual a 0. El 2-PSP puede ser formulado de la manera siguiente:

$$\min \sum_{k=1}^2 \sum_{i \neq j} C_{ij} x_{ijk} \tag{1}$$

Sujeto a

$$\sum_{i \in V} x_{ihk} = 1 \quad (h \in V; i \neq j; k = 1, 2) \tag{2}$$

$$\sum_{j \in V} x_{ihk} = 1 \quad (h \in V; i \neq j; k = 1, 2) \tag{3}$$

$$\sum_{\substack{i, j \in S \\ i \neq j}} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad (S \subset V, k = 1, 2) \tag{4}$$

4. Traveling Salesman Problem.

5. Formulación adaptada de la formulación propuesta en [5].

$$\sum_{k=1}^2 x_{ijk} \leq 1 \quad (i, j \in V; i \neq j) \quad (5)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (i, j \in V; i \neq j; k = 1, 2) \quad (6)$$

La función objetivo (1) consiste en la minimización del costo total de los arcos que forman parte de las dos rutas. Las restricciones (2) son las constantes de grado, es decir, cada ruta debe llegar y salir de cada nodo una sola vez. Las restricciones (3) son para la eliminación de subrutas. Las restricciones (4) son para asegurar que cada arco pertenece a una sola ruta.

Cuando  $m = 1$  y después de una transformación de las restricciones (2) se llega directamente a la formulación del TSP propuesta por Dantzing, Fulkerson y Jonson en [6], el cual es conocido como NP-difícil, lo que automáticamente prueba la np-dificultad del 2-PSP.

#### Cota inferior

Uno de los mecanismos para evaluar la calidad del resultado de una heurística es la relación existente entre el costo de la heurística y el costo óptimo. Con frecuencia el costo óptimo se desconoce, lo que obliga a la utilización de una cota inferior del problema, la cual se obtiene a partir de una relajación del problema inicial.

Para el caso donde  $m = 1$ , el  $m$ -PSP coincide con el TSP. Basándose en lo anterior, se decidió utilizar, para las instancias simétricas, una doble ejecución de la cota inferior conocida para el problema del agente viajero (TSP), prohibiendo los arcos comunes, como lo propone De Kort [7]. En el caso de distancias asimétricas, se utilizó como cota inferior el doble del valor óptimo conocido para la instancia en el TSP.

#### Caso simétrico

En el caso simétrico, la distancia (costo) de ir del nodo  $i$  al nodo  $j$  es igual en ambos sentidos. Es decir,  $C_{ij} = C_{ji}$   $(i \neq j) \in G$ . Cuando se relajan las restricciones (3) para todos los nodos, excepto uno, se llega a la formulación del “1-tree bound”, el cual es una de las cotas inferiores para el TSP; por tanto, se hace una doble ejecución de dicha cota, prohibiendo los arcos comunes. Esta es una verdadera cota inferior, ya que

corresponde siempre a la toma de los dos mejores arcos salientes de cada nodo.

#### Caso asimétrico

A diferencia del caso simétrico, la distancia de ir de  $i$  a  $j$  puede ser distinta a la distancia de ir de  $j$  a  $i$  ( $C_{ij} \neq C_{ji}$ ). Al relajar las restricciones de eliminación de subrutas (4) y con una relajación lineal de las restricciones (5), se llega a la formulación del problema de asignación, el cual es una cota inferior para el TSP asimétrico. En este caso, no puede utilizarse una doble ejecución de dicha cota, ya que no puede garantizarse para todas las instancias que las dos rutas obtenidas sean siempre de costo mínimo. En este caso, se calculó la cota como dos veces el valor óptimo del TSP asimétrico conocido para la instancia.

#### EL ALGORITMO

El algoritmo propuesto es de dos fases: en la primera, se construye la solución inicial; en la segunda, se mejora con una metaheurística de tipo búsqueda tabú. Para la construcción de la solución inicial, se utilizó la heurística del vecino más próximo con un procedimiento de inserción de arcos para evitar una segunda ruta no factible por violación de las restricciones (5).

#### Solución inicial

Las dos rutas que componen la solución inicial son construidas en serie, es decir, primero se construye la primera y luego la segunda. Para construir la primera ruta de la solución inicial se utilizó la heurística del vecino más próximo. Esta consiste en ir de un nodo al siguiente nodo más próximo, que no haya sido visitado aún. Para la segunda ruta, se prohíben los arcos que forman parte de la primera y se ejecuta de nuevo la heurística del vecino más próximo, pero se aplica un procedimiento de inserción de nodos para evitar la violación de las restricciones (5) en el momento de finalizar la ruta.

La búsqueda tabú<sup>6</sup>

La búsqueda tabú es una metaheurística que combina la búsqueda local con una heurística para evitar quedarse atrapado en mínimos locales. En este caso se busca, dentro del vecindario, la mejor solución, incluso si el costo aumenta. Para evitar devolverse a soluciones ya visitadas, se guarda la historia reciente de los movimientos en una memoria temporal llamada lista tabú. La búsqueda tabú se detiene cuando se alcanza un número dado de iteraciones, el cual puede ser establecido desde el inicio o un número de iteraciones sin mejora en el costo de la solución.

Esquema de vecindario

El vecindario  $N(s)$  de una solución  $s$  es el conjunto de soluciones vecinas que se pueden obtener a partir de  $s$  al aplicarle una transformación local, la cual puede ser cambio de sitio de un arco, intercambio de  $m$ -arcos, inversión de una subruta, etc.

Es ampliamente conocido que los vecindarios que utilizan los intercambios de tipo  $k$ -opt son la base de las heurísticas de mejor desempeño para los problemas de ruteo. De ahí que se decidió incorporar este tipo de vecindarios en el algoritmo propuesto, con  $k = 2$  y  $3$ . También se utilizó un vecindario llamado Meil-opt, el cual realiza una evaluación a priori de los vecindarios 2 y 3-opt y ejecuta el que proporciona el mejoramiento más grande.

La figura 1 muestra el esquema de vecindario 2-opt en el cual se cambian 2 arcos de la solución actual por 2 arcos nuevos y se invierte la cadena que se encuentra entre los arcos adicionados.

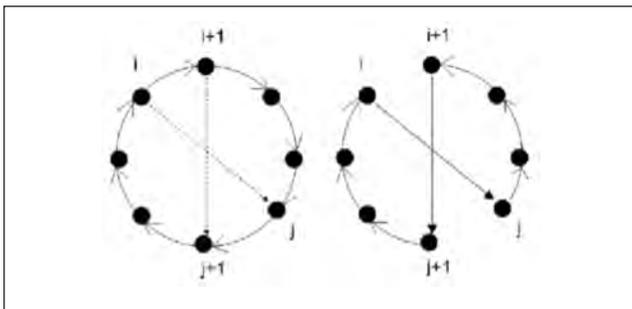


Figura 1. Intercambios 2-opt.

La figura 2 muestra las cuatro posibilidades del vecindario 3-opt que fueron tomadas en cuenta en este estudio.

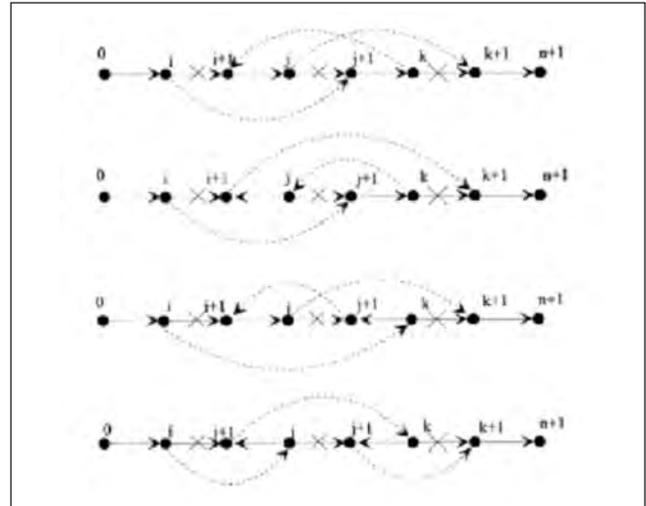


Figura 2. Posibilidades del 3-opt<sup>7</sup>.

Lista tabú

La búsqueda tabú utiliza una memoria de los movimientos recientes llamada lista tabú, la cual guarda la configuración de los últimos movimientos realizados para evitar el regreso a soluciones ya visitadas en el pasado. El número de iteraciones durante el cual un movimiento queda prohibido (clasificado como tabú) se llama talla de la lista tabú. Dicha talla puede ser estática o dinámica.

En este estudio, se escogió como lista tabú una matriz de tamaño  $n \times n$ , la cual guarda en la posición  $i, j$ -ésima el número de iteración en la que el arco  $i, j$  podrá ser utilizado de nuevo. Este número corresponde a la suma de la iteración actual y la talla de la lista tabú. Un arco  $(i, j)$  es considerado tabú (prohibido) si la  $i, j$ -ésima posición de la lista es mayor que o igual a la iteración actual.

La talla de la lista tabú utilizada es dinámica. Se inicia con un valor de 7 iteraciones y puede tomar valores entre 3 y 15 en función de la calidad de la región donde se encuentra la solución actual. Cuando se está dentro

6. Propuesta por Glover en [1].

7. Gráfica tomada de [4].

de una región donde el costo de la solución disminuye, la talla disminuye también; en caso contrario, la talla de la lista aumenta.

### Criterios de aspiración

Los criterios de aspiración permiten revocar los movimientos tabú cuando estos producen una solución. El criterio de aspiración utilizado en este estudio es el conocido como mejor global, es decir, cuando la solución  $S'$  que utiliza los movimientos tabú tiene un costo menor que la mejor solución  $S$  conocida hasta el momento.

### Penalización de arcos no factibles

Dado que el espacio de soluciones no es convexo, se decidió, una vez ubicados en el mínimo local, relajar las restricciones (5) y permitir la visita temporal de soluciones no factibles. En consecuencia, fue necesario agregar una penalización de los arcos que violen dichas restricciones.

Se agregó a la función objetivo (1) el término  $\alpha \left( \sum_k x_{ijk} - 1 \right)$ . El coeficiente  $\alpha$  se inicializó con la

relación  $\frac{LB}{n-1}$ , es decir, dicha penalización es, inicialmente, una especie de costo promedio de los arcos. En cada iteración se actualiza el coeficiente en función de la calidad de las soluciones. Si se encuentra en una adecuada región de soluciones, su valor es llevado al valor inicial. Si la región de soluciones actual es de mala calidad, aumenta el valor del coeficiente.

## RESULTADOS

El algoritmo descrito se escribió en C y fue probado en 25 instancias de la TSPLIB [8]; de estas, 12 son instancias simétricas y 13 son instancias asimétricas. El tamaño máximo de las instancias analizadas es 100 nodos y los criterios de finalización utilizados en la búsqueda tabú son 1000 iteraciones en total o 200 iteraciones sin mejora. Las pruebas se realizaron en un PC con procesador Pentium 4 de 2.6GHz y 512 Mb de memoria RAM.

### Instancias simétricas

La tabla 1 muestra el desempeño obtenido por el algoritmo con las instancias simétricas de la TSPLIB analizadas. En la primera columna, se presenta el tamaño de la instancia; en la segunda, aparece la cota inferior calculada según el procedimiento explicado anteriormente. Las columnas 3 a 5 muestran las diferencias obtenidas con respecto a la cota inferior para cada esquema de vecindario utilizado. Esta diferencia se calculó con la expresión:

$$\Delta(\%) = \frac{f(S) - LB}{LB} \times 100$$

**Tabla 1**  
Resultados: instancias simétricas

n	LB	2-Opt	3-Opt	Meil-Opt
		$\Delta(\%)$	$\Delta(\%)$	$\Delta(\%)$
51	882	16,9	15,9	13,5
52	15091	24,8	24,8	23,3
70	1388	17,2	14,4	12,3
76	1112	17,2	13,8	12,8
76	229899	21,0	20,2	19,4
99	2706	12,5	10,5	10,5
100	47433	15,9	13,6	13,4
100	49485	15,9	13,6	13,5
100	46381	15,6	13,5	13,5
100	47202	18,7	14,7	13,5
100	48921	15,7	15,2	15,0
100	17135	17,4	14,8	14,2
Promedio		17,4	15,3	14,6

Se observa que, para este tipo de instancias, los mejores resultados se obtienen con el esquema de vecindario Meil-Opt.

La tabla 2 presenta el tiempo de cálculo, en segundos de CPU, utilizado por el algoritmo para resolver las instancias. Se aprecia que el 2-Opt es el tipo de vecindario más rápido de todos los utilizados.

**Tabla 2**  
Tiempo de cálculo: Instancias simétricas

n	2-Opt	3-Opt	Meil-Opt
	TC	TC	TC
51	3	215	316
52	3	222	317
70	8	739	837
76	10	1022	1312
76	11	1073	1267
99	24	3059	3526
100	26	4182	3652
100	25	3022	3688
100	24	3654	3829
100	28	3353	3610
100	26	3170	3691
100	25	3121	3424

Instancias asimétricas

La tabla 3 muestra el desempeño del algoritmo para las instancias asimétricas analizadas. Se puede decir que, para este tipo de instancias, el mejor esquema de vecindario es el 3-Opt. También se puede apreciar que el esquema 2-Opt proporciona resultados muy poco competitivos frente a los otros esquemas utilizados. Con estas instancias se encontró el óptimo para la instancia de 17 nodos con los tres tipos de vecindario utilizados. Y se estuvo muy cerca del óptimo para la instancia de 43 nodos con los vecindarios 3-Opt y Meil-Opt.

**Tabla 3**  
Resultados: instancias asimétricas

n	LB	2-Opt	3-Opt	Meil-Opt
		Δ(%)	Δ(%)	Δ(%)
17	78	0,0	0,0	0,0
34	2653	35,3	14,7	14,3
36	3094	28,1	14,1	16,9
39	3177	20,1	16,5	18,0
43	11240	1,1	0,2	0,1
45	3430	30,5	15,6	15,6
48	3830	35,7	14,7	14,8
48	28359	23,5	7,0	7,7
53	13290	41,7	14,6	20,4
56	3463	42,9	22,7	20,1
65	4122	44,3	25,5	25,3
70	79561	14,8	6,7	25,5
71	4308	42,9	21,6	21,6
Promedio		33,9	13,4	13,9

Utilizando como criterio de evaluación el error promedio, el algoritmo proporciona mejores resultados para las instancias asimétricas que para las simétricas.

**Tabla 4**  
Tiempo de cálculo: Instancias asimétricas

n	2-Opt	3-Opt	Meil-Opt
	TC	TC	TC
17	0	2	2
34	0	18	22
36	1	41	26
39	1	35	32
43	1	41	132
45	1	46	86
48	1	106	100
48	1	52	67
53	1	151	210
56	2	206	139
65	2	195	204
70	5	350	408
71	5	489	787

La tabla 4 muestra el tiempo de cálculo, en segundos de CPU, que el algoritmo consumió para resolver las instancias asimétricas. Al comparar estos resultados con la tabla 2, se observa que el algoritmo ejecuta más rápidamente las instancias asimétricas.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Los resultados obtenidos son bastante satisfactorios, sobre todo con las instancias asimétricas, donde el mejor esquema de vecindario arroja un promedio de 13,4% de error con respecto a la cota inferior y donde se encontró el óptimo o se estuvo muy cerca de este para ciertas instancias en un tiempo de cálculo razonablemente corto.

Estos primeros resultados son bastante prometedores. Puede ser de interés estudiar los resultados arrojados con otras metaheurísticas, como el recocido simulado, los algoritmos genéticos, entre otras. También puede ser de interés conocer los efectos de la parametrización de la búsqueda tabú sobre los resultados, principalmente los efectos de la talla de la lista tabú, su dinámica, la inclusión de memorias a mediano y largo plazos; así como la construcción en paralelo de las soluciones.

REFERENCIAS

[1] Glover, F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers and Operations Research*, Vol. 13, no. 5, pp. 533-549.

[2] Lin, S., Kernighan, B. An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem, *Operations Research* 21, pp. 498-516.

[3] Krarup, J., The peripatetic salesman and some related unsolved problems, *Combinatorial Programming, Methods and Applications*, B. Roy ed., Dordrecht: Rediel, 1975.

[4] Della Croce, F., Paschos, V. and Wolfler Calvo, R., *Approximating the 2-peripatetic salesman Problem*, Working Paper.

[5] Duchenne E., Laporte G. and Semet F., *Branch and cut algorithms for the undirected m-peripateticsalesman problem*, Les cahiers du GERAD G-2003-2, University of Montreal, Canadá, 2003.

[6] Datzing G., Fulkerson D. and Johnson S. Solution of a large scale traveling salesman problem, *Operations Research* 2, pp. 393-410.

[7] De Kort, J.B.J.M. Lower Bounds for symmetric k-peripatetic salesman problems, *Optimization* 21, pp. 113-122.

[8] Reinelt, G. Universität Heidelberg, disponible en <http://www.iwr.uniheidelberg.de/groups/comopt/software/TSPLIB95/>

[9] Quintero-Araújo C.L., Ould-Louly, M.A., Wolfler-Calvo, R., 2006, *Développement de Méthodes Heuristiques pour le 2-Voyageur de Commerce Péripatétique*, Mosim'06 Actes de la 6<sup>e</sup> conférence francophone de Modélisation et Simulation, Rabat (Maroc), Vol 2., pp. 998-1002.



# Configuración logística para tratamiento de residuos hospitalarios peligrosos

DIANA MERCEDES RODRÍGUEZ COCA

Actualmente es profesor asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, Bogotá, 2006. Ingeniero Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 2000.

ANDRÉS MEDAGLIA

Actualmente es profesor asociado de la Universidad de los Andes. Postdoctorado, North Carolina State University, Estados Unidos 2002. Ph.D. in Operations Research, North Carolina State University, Estados Unidos 2001. Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, Bogotá, 1995. Ingeniero Industrial, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 1992.

Artículo recibido: 11/5/2007  
Evaluación par interno: 4/7/2007  
Aprobado: 13/03/2008

## Resumen

En el Departamento de Boyacá se generan aproximadamente 5 toneladas de residuos hospitalarios peligrosos por día. Cerca del 90% de estos son dispuestos en basureros abiertos o incinerados, lo cual se convertirá en un problema a corto plazo, ya que podrán aparecer epidemias y contaminar los productos agrícolas. Esta cifra no justifica la creación de una planta de desactivación; por tanto, se considerará como alternativa el transportarlos a la planta de Bogotá, ya que esta tiene exceso de capacidad. El propósito de este trabajo es diseñar una configuración logística para la recolección y el transporte de los residuos hospitalarios peligrosos generados en el Departamento de Boyacá, diseñando pequeños centros de consolidación bajo el esquema de plataformas de Cross Docking; localizarlos y asignarles los generadores utilizando modelos matemáticos de localización, basados en programación entera binaria; configurar el ruteo de vehículos dentro de los generadores asociados a un mismo centro, utilizando algoritmos genéticos.

## Abstract

The Boyaca Department generates approximately 5 tons of dangerous hospital wastes per day. About 90% of them are incinerated or disposed in open landfills, causing a public health hazard. The amount of this production does not justify local deactivation plants and, for this reason, the transport to Bogota's plant is considered as an alternative. The main objective of this paper is to design a logistic network for the gathering and transportation of the hospital wastes generated in Boyaca, creating small consolidating centers under the Cross Docking platform scheme; the location and the assignment of the generators using mathematical models of localization based in Integer Binary Programming and configuring the routing model for the vehicles inside the generator associated to the same center, using genetic algorithms.

## INTRODUCCIÓN

Sobre el manejo de los residuos peligrosos se está legislando en el mundo desde mediados de los años ochenta. Las medidas internacionales se iniciaron en 1989 con la firma de la Convención de Basilea, en la cual se establecen controles a los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y a su eliminación.

En 1999 la Unidad Ejecutiva de Servicios Públicos de Bogotá determinó que se generan aproximadamente 8.500 toneladas/año de residuos hospitalarios en Colombia, únicamente en los hospitales de niveles 1, 2 y 3 (Ministerio del Medio Ambiente y Ministerio de Salud, 2002). Aproximadamente el 40% de los residuos producidos en un hospital se pueden considerar con características infecciosas pero, debido a su mal manejo, el 60% restante se contamina (Ministerio del Medio Ambiente y Ministerio de Salud, 2002). Esto ha originado un fuerte incremento en los costos de tratamiento, el impacto y los riesgos sanitarios y ambientales.

El Ministerio del Medio Ambiente, en alianza con el Ministerio de Salud, está trabajando en el Programa Nacional para la Gestión Integral de Residuos Hospitalarios, teniendo en cuenta tres aspectos importantes: el presidente de la República emitió el Decreto 2676 de 2000 por el cual se reglamenta la gestión integral de residuos hospitalarios y similares; se está capacitando a las autoridades competentes de cada región del país promoviendo la implementación de la norma, y se publicó el *Manual de procedimientos para la gestión integral de residuos hospitalarios y similares*.

En el sector de Bogotá se generan aproximadamente 14 toneladas/día de residuos hospitalarios en los centros hospitalarios de niveles 1, 2 y 3 (Ministerio del Medio Ambiente y Ministerio de Salud, 2002), clasificados en residuos no peligrosos y peligrosos. Estos últimos pueden ser llevados a rellenos sanitarios, al igual que los no peligrosos, previa desactivación que garantice la desinfección. Actualmente no existe en Bogotá una empresa dedicada a la desactivación, y la desinfección se realiza a través de la incineración, la cual en muchos casos no cumple la normatividad vigente sobre estándares de microorganismos aceptados en este tipo de residuos. Para subsanar dicho problema, está en proceso de concesión, por parte de la Alcaldía, el funcionamiento de una gran planta de desactivación de residuos peligrosos

hospitalarios en la ciudad de Bogotá, la cual reduciría significativamente los impactos ambientales y el monto de dinero pagado a los actuales incineradores. Dicha planta tendrá una capacidad de desactivación aproximada de 25 toneladas/día (Bello, 2003).

En el Departamento de Boyacá se generan aproximadamente 5 toneladas/día de residuos hospitalarios peligrosos, entre los prestadores de servicios de salud de niveles 0, 1, 2 y 3, los cuales no se tratan de manera adecuada. Actualmente se incineran entre 10 y 15% de los residuos hospitalarios peligrosos; la cantidad restante se envía a basureros abiertos, a fuentes superficiales o se entierra (Bello, 2003). Estas prácticas se consideran un mal manejo de los residuos hospitalarios peligrosos debido a que estos podrían generar epidemias y contaminar los productos agrícolas.

La cifra de generación de residuos hospitalarios peligrosos del Departamento de Boyacá no justifica, en términos netamente económicos, la creación de una planta de desactivación debido a que la construcción y puesta en marcha de la misma requiere una gran inversión. Por tal razón se considera como alternativa el transportar los residuos hospitalarios peligrosos a la planta de desactivación de Bogotá que se planea construir, y cuya capacidad le permite prestar el servicio de desactivación de residuos hospitalarios peligrosos a los generadores del Departamento.

## MARCO TEÓRICO

### Problemas de localización

Se refieren a la toma de decisiones relacionadas con la ubicación de uno o varios centros de servicio en una zona geográfica, optimizando criterios económicos o sociales, entre otros.

La ubicación geográfica de bodegas de almacenamiento de café (Villegas, 2003), centros de servicio de instalaciones humanitarias (Jacobs, Murat y Clemson, 1996), rellenos sanitarios (Antunes, 1999; Nie, Li, Yan, Wang y Ma, 2004) se puede asociar a los problemas de localización tradicionalmente tratados en la investigación de operaciones.

Los problemas de localización pueden clasificarse en continuos y discretos. Continuos cuando las instalaciones a localizar pueden ubicarse en cualquier punto

sobre el plano o sobre la red, y discretos cuando solo pueden ubicarse en puntos predeterminados. Para la ubicación de las instalaciones es necesario calcular los arcos existentes entre los diversos puntos que se van a localizar y conectar. Para calcular estos arcos (distancias de conexión), se puede recurrir a métodos derivados de las distancias Minkowski, entre las cuales están la distancia rectangular o Manhattan, distancia euclidiana o distancia Chebyshev, o a las distancias geográficas.

Los arcos incluidos en el análisis de la localización de instalaciones corresponden a las distancias más cortas posibles entre los puntos a conectar. Para determinar estos valores, se utiliza el algoritmo Dijkstra. La función objetivo de este tipo de problemas se ha enfocado de varias maneras; la más empleada busca ubicar las instalaciones lo más cerca posible de los clientes potenciales.

En el caso de ubicar instalaciones no deseadas, existe controversia debido a que los clientes quieren que estén ubicadas lo más lejos posible de los clientes potenciales; simultáneamente las compañías buscan minimizar costos logrando ubicarlas lo más cerca posible de los grandes generadores. Para la modelación de este problema se emplea una función multiobjetivo, en la que se busca minimizar los costos de las compañías y la población expuesta.

Las restricciones comúnmente utilizadas en este tipo de problemas están relacionadas con balances de demanda versus capacidad de instalaciones, atención de clientes, apertura de las instalaciones posibles y asignaciones de clientes a instalaciones abiertas. Una ampliación de lo presentado se encuentra en Revelle y Eiselt (2004) y Francis (1974).

### Problema Vehicle Routing Problem (VRP)

El costo logístico asociado al transporte es uno de los ítems que tiene mayor incidencia sobre el valor transferido al usuario final del servicio. Por esta razón se ha estudiado ampliamente la minimización de los costos relacionados con el ruteo de los vehículos (VRP).

En el problema tradicional de VRP, se han identificado numerosas restricciones, entre las cuales se encuentran: capacidad limitada en los vehículos, intervalos de tiempo para visitar a los clientes, varios centros de servicio, distancias máximas o mínimas de recorridos, clientes que requieran ser visitados por varios vehículos,

aleatoriedad en datos relacionados con el problema, como número de clientes y demandas. Estas restricciones han dado origen a variaciones del problema de VRP original.

Los problemas de VRP son solucionados principalmente con métodos heurísticos y metaheurísticos, debido a que emplean un tiempo de computación más corto que el empleado por las técnicas de programación matemáticas. La literatura menciona que los segundos métodos mencionados reportan mejor solución, en términos de calidad, al problema VRP.

Entre estos métodos se encuentran colonias de hormigas, enfriamiento simulado, algoritmos genéticos y búsqueda tabú.

En este trabajo se propone como método de solución al problema planteado el uso de algoritmos genéticos (GA), por la facilidad de acceder a la biblioteca de la clase JGA disponible en <http://copa.uniandes.edu.co/software/>. Para validar estos resultados, se utiliza el algoritmo del vecino más cercano. Una explicación detallada de GA se encuentra en García (n.d.) y en Glover (1996).

En la determinación de rutas de mercancías peligrosas y especiales, la literatura reporta estudios específicos en los cuales se tratan criterios de optimización como costos de transporte versus valores de los seguros, los cuales están asociados a riesgos y pérdidas económicas (Verter y Erkut, 1995); riesgo social del transporte de residuos peligrosos, definido como la relación entre la probabilidad de que ocurra un evento durante el transporte y la consecuencia del mismo, entendiendo este último como la cantidad de centros de población cercanos al lugar de ocurrencia del evento en Verter y Erkut (1997).

En la literatura también se encuentra que el criterio de la ruta más corta ha sido tratado como inexacto en el caso puntual de este tipo de ruteos (Kara, Erkut y Verter, 2003), debido a que no contempla los riesgos asociados a las características de las mercancías transportadas.

Por las características infecciosas de los residuos hospitalarios peligrosos, es indispensable modelar el problema de ruteo con una restricción especial de tiempo máximo de recorrido. En este caso particular, se modeló fijando la máxima distancia recorrida por los vehículos en un tiempo determinado, DCVRP. La literatura reporta estudios a este problema en Laporte Desrochers y Nobert (1984).

## SITUACIÓN ACTUAL DE BOYACÁ

### Cantidad de generadores en el Departamento de Boyacá

Los generadores se ubican en cada uno de los 123 municipios del Departamento. Para determinar la cantidad real de generadores en cada municipio, se consultó la Dirección General de Calidad del Ministerio de Salud, que reportó 1.194 generadores en los 123 municipios.

También se consultó la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá). Según esta entidad, existen 1.453 generadores en 14 municipios.

La diferencia entre la cantidad de generadores establecidos por el Ministerio de Salud y por Corpoboyacá permite concluir que es indispensable realizar estudios para conocer la verdadera magnitud de la generación de residuos hospitalarios peligrosos con el fin de determinar los impactos ambientales y económicos del presente trabajo.

### Cantidad de residuos hospitalarios peligrosos generados diariamente

Una vez identificados los generadores, es preciso determinar la cantidad de residuos hospitalarios generados diariamente. Para esto se recurre a un trabajo realizado por Corpoboyacá (Acero, 2003). Dicho trabajo consiste en visitar las principales instituciones prestadoras de servicios de salud en 14 municipios y determinar la cantidad de residuos hospitalarios peligrosos producidos en cada dependencia. Para los demás generadores no existe un estudio similar. Por tal razón, se calcula un índice de producción estimado de la relación entre el nivel hospitalario (Fuente: Dirección General de Calidad del Ministerio de Salud), el nivel de producción de residuos hospitalarios peligrosos (Fuente: Corpoboyacá) y la cantidad de habitantes del municipio (Fuente: Dane). Los índices obtenidos tienen los siguientes valores aproximados: nivel hospitalario 3: 0.0025 kg/día; nivel 2: 0,0014 kg/día; nivel 1: 0.0020 kg/día; y nivel 0: 0,0016 kg/día.

A partir de los índices calculados por nivel se estima que la cantidad de residuos hospitalarios peligrosos generados en la totalidad del Departamento de Boyacá asciende a 5,020 kg/día.

## DISEÑO DE LOS CSC

Los Centros Satélites de Consolidación (CSC) son lugares donde llegan camiones de diferentes puntos del Departamento de Boyacá. Los vehículos dejan los residuos para ser consolidados y, posteriormente, recogidos y transportados hacia la planta de desactivación ubicada en Bogotá.

Para el correcto funcionamiento de los CSC, es necesario que los residuos hospitalarios peligrosos lleguen correctamente clasificados y empacados, y que los vehículos cumplan la normatividad existente.

Estos lugares funcionan con las características propias de una plataforma de cross docking (Gue, 2001) y una planta de manejo de residuos hospitalarios peligrosos (Ministerio del Medio Ambiente y Ministerio de Salud, 2002). Desde el punto de vista de infraestructura, el CSC debe contener, como mínimo, zonas de carga, descarga, consolidación, lavado de vehículos, lavandería, cafetería, almacén de insumos, baños, duchas y vestidores.

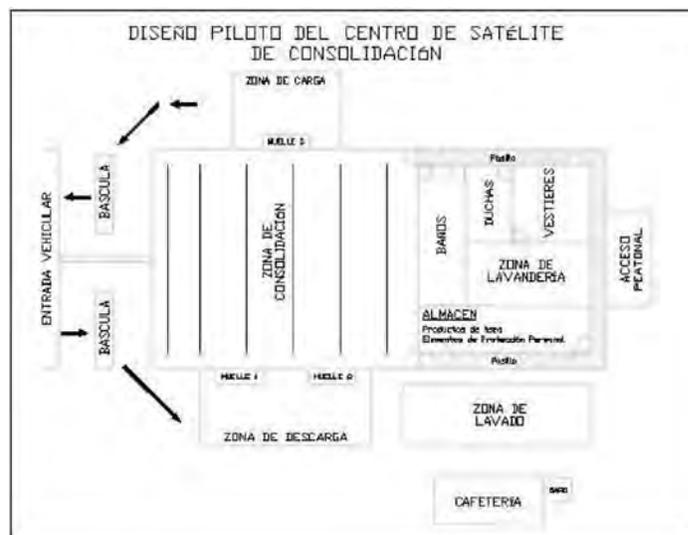


Figura 1. Bosquejo piloto locativo.

El valor estimado para la construcción de un CSC, con una capacidad estimada de 5 toneladas/día de residuos hospitalarios peligrosos, es aproximadamente 30.000.000 de pesos colombianos sin incluir el costo del terreno.

Los vehículos que recolecten o transporten residuos peligrosos deben contar, como mínimo, con las características presentadas en Ministerio del Medio Ambiente y Ministerio de Salud (2002). De acuerdo con la información encontrada en el trabajo (Flechas, 2004), los costos de transporte en los que se incurre para la movilización de residuos peligrosos ascienden a \$377/km.

### DISEÑO DE LA CONFIGURACIÓN LOGÍSTICA

Se presentó el diseño de los CSC. Los siguientes interrogantes se relacionan con la localización de los CSC, la asignación de los generadores a los mismos y con la configuración del ruteo de vehículos dentro de los generadores asociados a un CSC.

#### Modelos de localización

A continuación se plantean dos modelos que utilizan programación entera binaria. Después se desarrollan dos variaciones del último planteamiento, cuya diferencia consiste en restringir o no la capacidad de almacenamiento de los CSC que se van a localizar. La primera variación será reconocida en este trabajo como modelo capacitado; la segunda, como no capacitado.

#### Formulación del modelo de localización

##### Modelo que contempla la población expuesta

Los CSC pueden llegar a considerarse como instalaciones no deseadas, debido a que en ellos se almacenarán temporalmente residuos hospitalarios peligrosos. Este modelo busca minimizar la cantidad de población expuesta, asociada a la localización.

Sea  $I = \{1, \dots, m\}$  el conjunto de lugares donde se pueden localizar los CSC.

Sea  $J = \{1, \dots, n\}$  el conjunto de generadores de residuos hospitalarios. Sea  $d_j$  la demanda del generador  $j$ . Sea  $s_i$  la capacidad en kg de los CSC localizados en  $i$ . Sea  $c_{ij}$  el costo, en metros, de asignar el generador  $j$  al CSC localizado en  $i$ . Sea  $p_i$  la población de los lugares donde se pueden localizar los CSC. Sea  $K$  la cantidad de CSC disponibles para ser abiertos.

Sea la variable de decisión binaria  $y_i = 1$ , si el CSC  $i$  es abierto, o  $y_i = 0$  en el caso contrario. Sea la variable de decisión binaria  $x_{ij} = 1$ , si el generador  $j$  es atendido por el CSC  $i$ , o  $x_{ij} = 0$  en el caso contrario.

La formulación del problema de localización de los CSC es la siguiente:

$$\min z_1 = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} c_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

$$\min z_2 = \sum_{i \in I} p_i y_i \tag{2}$$

Sujeto a

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 \quad , \quad j \in J \tag{3}$$

$$\sum_{i \in I} Y_i = K \tag{4}$$

$$X_{ij} \leq Y_j \quad ; \quad j \in J, i \in I \tag{5}$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad ; \quad j \in J, i \in I \tag{6}$$

$$Y_i \in \{0,1\} \quad , \quad i \in I \tag{7}$$

La primera función objetivo (1) busca minimizar el costo total de asignar los generados a los CSC abiertos. La segunda función objetivo (2) busca minimizar la población afectada con la apertura de los CSC. La restricción (3) (junto con la definición (6) garantiza que cada generador sea atendido por un CSC. La restricción (4) garantiza que se abra la cantidad de CSC disponibles. La restricción (5) obliga a que los generadores sean asignados a CSC abiertos. Finalmente, en (6) y (7) se definen las variables de decisión del problema.

#### Modelo capacitado y no capacitado

Sea  $I = \{1, \dots, m\}$  el conjunto de lugares donde se pueden localizar los CSC. Sea  $J = \{1, \dots, n\}$  el conjunto de generadores de residuos hospitalarios. Sea  $f_i$  y  $s_i$  el costo fijo de abrir un CSC localizado en  $i$  y la capacidad en kilogramos de los CSC localizados en  $i$ , respectivamente. Sea  $d_j$  la demanda del generador  $j$ . Sea  $c_{ij}$  el costo, en metros, de asignar el generador  $j$  al CSC localizado en  $i$ . Sea  $K$  la cantidad de CSC disponibles para ser abiertos.

Sea la variable de decisión binaria  $y_i = 1$ , si el CSC  $i$  es abierto o  $y_i = 0$  en el caso contrario. Sea la variable

de decisión binaria  $x_{ij} = 1$ , si el generador  $j$  es atendido por el CSC  $i$ , o  $x_{ij} = 0$  en el caso contrario.

La formulación del problema de localización de los CSC es la siguiente:

$$\min z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} X_{ij} + \sum_{i \in I} f_i Y_i \quad (8)$$

Sujeto a

$$\sum_{j \in J} d_j x_{ij} \leq s_i, \quad i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1, \quad j \in J \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = K \quad (11)$$

$$X_{ij} \leq Y_j; \quad j \in J, i \in I \quad (12)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}; \quad j \in J, i \in I \quad (13)$$

$$Y_i \in \{0,1\}, \quad i \in I \quad (14)$$

La función objetivo (8) representa el costo de satisfacer la demanda de los generadores, asociado a la localización de los CSC, y la asignación a los mismos a los generadores. La restricción (9) garantiza que la cantidad de residuos hospitalarios asignados a CSC no sobrepasen la capacidad del mismo (esta restricción se eliminará en algunas de las corridas a realizar). La restricción (10), junto con la definición (13), garantiza que cada generador sea atendido por un CSC. La restricción (11) garantiza que se abra la cantidad de CSC disponibles. La restricción (12) obliga a que los generadores sean asignados a CSC abiertos. Finalmente, en (13) y (14) se definen las variables de decisión del problema.

Dado que el costo por abrir un CSC es igual, el término  $\sum_{i \in I} f_i y_i$  se puede obviar en la función objetivo (8).

#### Construcción de la matriz de costos de asignación

El costo  $c_{ij}$  está determinado por las distancias geográficas reales que unen los 123 municipios del Departamento de Boyacá. Para determinar el costo mínimo, se utiliza el algoritmo Dijkstra, facilitado por Andrés Medaglia, apoyado en una base de datos, diseñada y calculada utilizando un sistema de información geográfica y proporcionada por la empresa Mapas y Datos S.A.

#### Resultados del modelo de localización desarrollado

Utilizando las variaciones del modelo de localización (capacitado y no capacitado), se analiza la posible localización de los CSC en el Departamento de Boyacá y se determinan los generadores asociados a cada uno de ellos. El problema de optimización se resuelve utilizando el software Xpres-MP de Dash Optimization.

Se corrieron en total ocho escenarios. En cuatro escenarios se modificó el número de CSC por localizar ( $K$ ) y su capacidad  $s_i$  se mantuvo constante para todos los CSC (modelo capacitado). Este último valor se calculó de la siguiente forma:

$$s_i = \sum_{j \in J} d_j / K \quad (15)$$

En los escenarios restantes se suprimió la restricción (9), buscando que el modelo asigne los generadores al CSC sin importar la capacidad de los mismos (modelo no capacitado).

En la tablas 1 y 2 se presentan los resultados obtenidos en los dos modelos ejecutados. El costo de asignación se refiere al valor en pesos de asignar el generador  $j$  al CSC localizado en  $i$ , analizando únicamente un recorrido (ida o regreso). Este valor se utiliza como referencia para comparar los resultados. Es importante resaltar que todos los escenarios se solucionaron óptimamente.

**Tabla 1**  
Resultados del modelo de localización capacitado

k	Tiempo CPU (segundos)	Costo de asignación
1	28.571	\$3.459.220
2	57.002	\$2.427.120
3	157.534	\$1.998.560
4	1.471.9	\$1.686.160

**Tabla 2**  
Resultados del modelo de localización no capacitado

k	Tiempo CPU (segundos)	Costo de asignación
1	28.109	\$3.459.220
2	6.641	\$2.390.690
3	8.078	\$1.970.490
4	7.812	\$1.606.970

Los modelos funcionan con 120 generadores, ya que se eliminan los generadores de Pisba, Paya y Cubará, los cuales no tienen carreteras que permitan llegar a ellos desde los otros generadores.

De acuerdo con la cantidad de CSC a localizar y la inclusión o exclusión de la restricción (9), en las tablas 3 y 4 se presentan los lugares propuestos para localizar los CSC.

**Tabla 3**  
Municipios candidatos para localizar los CSC capacitados

K	Lugares
1	Oicatá
2	Boyacá, Paz del Río
3	Boyacá, Paz del Río, Caldas
4	Sáchica, La Uvita, Nobsa, Garagoa

**Tabla 4**  
Municipios candidatos para localizar los CSC no capacitados

K	Lugares
1	Oicatá
2	Boyacá, Paz del Río
3	Boyacá, Paz del Río, Caldas
4	Villa de Leyva, La Uvita, Nobsa, Garagoa

Al visualizar gráficamente la información presentada en las tablas 3 y 4, puede concluirse que el resultado de las corridas, en términos de localización de CSC y generadores asociados a los mismos, es consistente con la geografía del Departamento de Boyacá. Además, la diferencia entre los resultados de los dos modelos, capacitado y no capacitado, se centra en las capacidades asignadas en cada CSC y, para el caso particular de  $K = 4$ , el lugar candidato para localizar uno de los CSC cambia de Sáchica a Villa de Leyva.

#### Conclusión del modelo de localización

Es prematuro indicar cuántos CSC se deben abrir y dónde se deben ubicar, pues el paso siguiente es formular el algoritmo de ruteo con el fin de determinar el diseño final de la configuración logística para recolección y transporte de residuos peligrosos del Departamento de Boyacá, con el cual se puede determinar el costo total aproximado de la operación.

#### Solución del problema DCVRP con algoritmos genéticos

##### Desarrollo del método de solución propuesto

El método de solución propuesto para determinar el ruteo de los vehículos, asignados a un mismo CSC, es el uso de la meta heurística algoritmos genéticos. Para tal fin se utiliza y modifica la implementación del JGA, realizada por Medaglia y Gutiérrez (2005) para resolver el problema CVRP.

Para conocer el algoritmo empleado y las características del mismo, puede referirse a Medaglia y Gutiérrez (2005).

##### Ajuste de parámetros

Con la información obtenida del modelo de localización, se generan experimentos cuyo objetivo es buscar el mejor ruteo posible para los vehículos dentro de los generadores asociados a un mismo CSC, en términos netamente económicos. Es importante aclarar que se determina una solución factible para cada uno de los escenarios asociados al problema de localización resuelto anteriormente.

Los experimentos consisten en variar los parámetros de poblaciones, generaciones, mutaciones o cruces con el fin de determinar la combinación que genere el menor valor de la función objetivo. En el caso de empates, se utiliza como segundo criterio de selección la cantidad de vehículos; si aún persiste el empate, se utiliza como tercer criterio el tiempo computacional.

##### Experimentos computacionales

Una vez aproximados los parámetros iniciales, se procede a variar el valor del parámetro semilla desde uno hasta diez y se calcula el valor de la función objetivo.

A continuación se presenta un ejemplo de los resultados arrojados por JGA. En este caso, se puede concluir que es necesario contar con dos vehículos que visiten los municipios en el orden indicado por la permutación, en la que cada número representa un municipio del Departamento de Boyacá.

\*\*\*\*\*

Vehicle data:

Travel's capacity: 480000.0

\*\*\*\*\*

Start Running .....

StatCollector Summary

Begin time: 12 de agosto de 2005 10:39:50 AM COT

End time: 12 de agosto de 2005 10:53:55 AM COT

Execution Time: 844480 millisec.

Function evaluations: 475965

835533.0

GVRGenotype: GVRGenotype@1a626f &lt;

[ Permutation: 0 size=20 load=674.62 travel=415938.0

|28 |39 |40 |26 |31 |6 |16 |4 |12 |19 |15 |24 |21 |23

|32|22 |43 |3 |5 |27 ]

[ Permutation: 1 size=26 load=1369.4598

travel=419595.0

|45 |33 |17 |41 |8 |34 |30 |38 |1 |14 |13 |29 |44 |25

|2|46 |10 |9 |35 |37 |42 |20 |11 |18 |36 |7 ]

&gt;

C:\DVRP&gt;

Los campos: size=20 load=674.62 travel=415938.0: representan la cantidad de municipios por visitar, la cantidad en kilogramos a transportar y la cantidad de metros a recorrer, respectivamente.

#### Resultados del método de solución GA

Los resultados presentados en las tablas 5 y 6 se obtienen para los escenarios capacitados y no capacitados, y corresponden a los valores mínimos de la función objetivo.

**Tabla 5**

Resultados del DCVRP aplicado al modelo de localización capacitado

K	Localización	No. Vehículos	Costo total
1	Oicatá	5	\$820.574
2	Boyacá Paz del Río	3 2	\$791.073
3	Boyacá Paz del Río Caldas	3 2 2	\$745.972
4	Garagoa La Uvita Nobsa Sáchica	1 1 2 2	\$864.715

**Tabla 6**

Resultados del DCVRP aplicado al modelo de localización no capacitado

K	Localización	No. Vehículos	Costo total
1	Oicatá	5	\$820.574
2	Boyacá Paz del Río	3 2	\$754.637
3	Boyacá Paz del Río Caldas	2 2 2	\$733.793
4	Garagoa La Uvita Nobsa Villa de Leyva	1 1 2 2	\$780.917

Analizando las anteriores tablas, puede concluirse que la mejor solución encontrada corresponde al escenario no capacitado asociado a la apertura de 3 CSC.

Solución del problema de ruteo con el algoritmo del vecino más cercano

Desarrollo del algoritmo del vecino más cercano

Este método de solución para determinar el ruteo de los vehículos, asignados a un mismo CSC, se desarrolla a través de la programación en Visual Basic del algoritmo del vecino más cercano. Para obtener los resultados del ruteo, la cantidad de vehículos y los costos de cada escenario, se utilizan como datos iniciales los arrojados por el modelo de localización, sobre los cuales se aplica el algoritmo mencionado.

Resultados del algoritmo del vecino más cercano

Los resultados presentados en las tablas 7 y 8 se obtienen para los escenarios capacitados y no capacitados.

**Tabla 7**

Resultados del algoritmo del vecino más cercano aplicado al modelo de localización capacitado

K	Localización	No. Vehículos	Costo total
1	Oicatá	5	\$898.158
2	Boyacá Paz del Río	4 2	\$957.785
3	Boyacá Paz del Río Caldas	2 2 2	\$906.754
4	Garagoa La Uvita Nobsa Sáchica	1 1 2 2	\$1.014.964

**Tabla 8**  
Resultados del algoritmo del vecino más cercano aplicado al modelo de localización no capacitado

K	Localización	No. Vehículos	Costo total
1	Oicatá	5	\$898.158
2	Boyacá Paz del Río	4 2	\$905.511
3	Boyacá Paz del Río Caldas	2 2 2	\$901.375
4	Garagoa La Uvita Nobsa Villa de Leyva	1 1 2 3	\$924.030

Analizando estas tablas, puede concluirse que la mejor solución encontrada para los escenarios capacitados y no capacitados está asociada a la apertura de un CSC.

Comparación de los resultados arrojados por GA y vecino más cercano

Los resultados presentados en las tablas 9 y 10 se obtienen para los escenarios capacitados y no capacitados.

**Tabla 9**  
Comparación de resultados aplicando GA y algoritmo del vecino más cercano, para escenarios capacitados

K	Costo total GA	Costo total vecino
1	\$820.574	\$898.158
2	\$791.073	\$957.785
3	\$745.972	\$906.754
4	\$864.715	\$1.014.964

**Tabla 10**  
Comparación de resultados aplicando GA y algoritmo del vecino más cercano al modelo de localización no capacitado

K	Costo total GA	Costo total vecino
1	\$820.574	\$898.158
2	\$754.637	\$905.511
3	\$733.793	\$901.375
4	\$780.917	\$924.030

Al comparar los resultados presentados, se observa que los GA arrojan menores valores de la función objetivo. Por tanto, la mejor opción es abrir 3 CSC, localizados de acuerdo con el modelo de localización no capacitado y ruteados a partir de GA.

Conclusión del ruteo de los vehículos

Al comparar los dos mejores escenarios de los modelos capacitados y no capacitados, se puede concluir que la mejor solución encontrada, desde el punto de vista de ruteo, es arrojada por GA y consiste en abrir los 3 CSC determinados en el modelo de localización no capacitado.

Sin embargo, las soluciones encontradas a través de estos experimentos computacionales deben ser analizadas incluyendo los costos de construcción de los CSC, con lo cual se puede determinar el escenario que genere la mejor solución.

Integración, localización y ruteo

El costo total de la configuración está determinado por la unión de los resultados generados a partir del modelo de localización y del algoritmo de ruteo.

En las tablas 11 y 12, se presentan los resultados discriminados para los modelos capacitados y no capacitados.

**Tabla 11**  
Resultados del modelo localización y DCVRP para los escenarios capacitados

K	Localización	No. Vehículos	Costo total
1	Oicatá	5	\$824.734
2	Boyacá Paz del Río	3 2	\$799.393
3	Boyacá Paz del Río Caldas	3 2 2	\$758.452
4	Garagoa La Uvita Nobsa Sachica	1 1 2 2	\$881.355

**Tabla 12**  
Resultados del modelo localización y DCVRP para los escenarios no capacitados

K	Localización	No. Vehículos	Costo total
1	Oicatá	5	\$824.734
2	Boyacá	3	\$762.957
	Paz del Río	2	
3	Boyacá	2	\$746.273
	Paz del Río	2	
	Caldas	2	
4	Garagoa	1	\$797.557
	La Uvita	1	
	Nobsa	2	
	Villa de Leyva	2	

Analizando las tablas anteriores, puede concluirse que la mejor solución encontrada corresponde a la apertura de 3 CSC, ubicados de acuerdo con los resultados arrojados por el modelo de localización en el escenario no capacitado.

La configuración logística para la recolección y el transporte de los residuos hospitalarios peligrosos del Departamento de Boyacá está determinada por los siguientes aspectos:

- Construcción de 3 CSC en los municipios de Caldas, Boyacá y Paz del Río.
- Adquisición de 6 vehículos que recolecten diariamente los residuos hospitalarios.
- El costo diario aproximado del ruteo es 733.793 pesos colombianos.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La solución final planteada es la mejor alternativa obtenida, pero no se puede afirmar que sea la óptima, debido a los componentes de aleatoriedad presentes en los GA.

El modelo matemático de localización y el algoritmo de ruteo implementados pueden utilizarse en el diseño de la configuración logística para la recolección y el transporte de los residuos hospitalarios peligrosos de todo el país.

Desarrollar el modelo contemplando la población expuesta puede arrojar una opción de comparación importante a la hora de implementar el presente trabajo, en caso de hacerlo.

La existencia de bases de datos no actualizadas, relacionadas con la cantidad de generadores de residuos hospitalarios en el Departamento de Boyacá, es evidente debido a la incongruencia de información suministrada por Corpoboyacá y el Ministerio de Salud. Este hecho dificultó la realización de este proyecto y dificultaría el desarrollar la configuración logística para el resto del país.

La puesta en marcha de este proyecto permitiría disminuir los costos pagados por los generadores de residuos hospitalarios peligrosos actualmente y reducir los riesgos ambientales asociados a la mala manipulación de los mismos.

El uso de modelos matemáticos de programación entera y metaheurísticas, en este caso GA, permiten planear operaciones logísticas con estimaciones de costos aproximados a los reales. Esta es una herramienta útil para que las organizaciones tomen decisiones a corto o largo plazos.

La herramienta de JAVA utilizada para calcular la ruta más corta puede mejorarse automatizando las corridas de forma que este tome de la base de datos los nodos a analizar y escriba los resultados en un archivo de texto.

## REFERENCIAS

- Acero, F. (2003). *Estudio de diagnóstico de residuos sólidos hospitalarios*. Corporación Autónoma Regional de Boyacá.
- Antunes, A. P. (1999). *Location analysis helps manage solid waste in central Portugal*, Interfaces.
- Bello, C. A. (2003). Entrevista. Actualmente trabaja en el Ministerio del Medio Ambiente.
- Flechas, M. (2004). *Prestación del servicio de manejo y gestión integral de residuos hospitalarios peligrosos y similares en la ciudad de Tunja*. Tesis. Escuela Colombiana de Ingeniería (Especialista en Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos).
- Francis, W. J. (1974). *Facility Layout and Location*, Prentice Hall.
- García, A. (s.f.). *Optimización de rutas, seguridad en el transporte y sistemas gis*. Escuela Politécnica Superior, Universidad de La Coruña.
- Glover, F. (1996). *Optimización heurística y redes neuronales*. Paraninfo.
- Gue, K. (2001). *Crossdocking: Just-in-time for distribution*. Naval Postgraduate School, Monterrey.
- Jacobs, D., Murat, S. & Clemson, B. (1996). *An analysis of alternative locations and service areas of american red cross blood facilities*. Interfaces.
- Kara, B., Erkut, E. & Verter, V. (2003). Accurate calculation of hazardous materials transport risks, Operations Research Letters.
- Laporte, G., Desrochers, M. & Nobert, Y. (1984). Two exact algorithms for the distance constrained vehicle routing problem, Networks.
- Medaglia, A. y Gutiérrez, E. (2005). *An object oriented framework for rapid development of genetic algorithms with appli-*

- cation to operations management and vehicle routing*. Centro para la Optimización y Probabilidad Aplicada. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de los Andes.
- Ministerio del Medio Ambiente y Ministerio de Salud (2002). *Gestión integral de residuos hospitalarios y similares en Colombia, manual de procedimientos*. Programa Fortalecimiento Institucional para la Gestión Urbana.
- Nie, Y., Li, T., Yan, G., Wang, Y. & Ma, X. (2004). *An optimal model and its application for the management of municipal solid waste from regional samll cities in China*, Air & Waste Management Association .
- Revelle, C. & Eiselt, H. (2004). Location analysis: A synthesis and survey, *European Journal of Operational Research*.
- Verter, V. & Erkut, E. (1995). A framework for hazardous materials transport risk assessment, *Risk Analysis* .
- Verter, V. & Erkut, E. (1997). Incorporating insurance costs in hazardous materials routing models. *Transportation Science* .
- Villegas, J. G. (2003). *Problemas de localización multiobjetivo*. Tesis de maestría. Universidad de Los Andes.



## AUTORES EN ESTE NÚMERO

---

### GABRIEL VALENCIA CLEMENT

Ingeniero civil, profesor titular de la Universidad Nacional de Colombia.

### SERGIO VILLAR SALINAS

Ingeniero civil, estudiante de maestría en estructuras de la Universidad Nacional de Colombia.

### ENGELBERTO MANUEL CAÑAVERA ESPINOSA

Ingeniero civil, especialista en recursos hidráulicos y medio ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

### CARLOS ANDRÉS DUARTE MATEUS

Ingeniero civil, especialista en recursos hidráulicos y medio ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

### JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

Ingeniero civil, MEEE, profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

### SANDRA X. CAMPAGNOLI MARTÍNEZ

Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Especialista en Mecánica de suelos y cimentaciones de la Universidad Politécnica de Madrid, España. Especialista en Geotecnia de la Universidad Nacional de Colombia. Directora del Centro de estudios geotécnicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería. [scampa@escuelaing.edu.co](mailto:scampa@escuelaing.edu.co)

### CLAUDIA PATRICIA LÓPEZ P.

Estudiante de último semestre de ingeniería civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Estudiante proyecto dirigido sobre el Ensayo Micro Deval. [claudi\\_lo@hotmail.com](mailto:claudi_lo@hotmail.com)

### ALEXANDRE SILVA DE LIMA

Federal Center for Technological Education - CEFET/RJ CEP 26.041-271 – Rio de Janeiro, RJ, Brazil. e-mail: [alima@cefet-rj.br](mailto:alima@cefet-rj.br)

### MAX SUELL DUTRA

Robotic and Automation Laboratory – COPPE/UFRJ. Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ Postal Box 68.503 – CEP 21.945-970 Rio de Janeiro, RJ, Brazil. e-mail: [max@mecanica.coppe.ufrj.br](mailto:max@mecanica.coppe.ufrj.br)

### FABRÍCIO LOPES E SILVA

Robotic and Automation Laboratory – COPPE/UFRJ. Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ e-mail: [falopes@ufrj.br](mailto:falopes@ufrj.br)

### OMAR LENGGERKE PÉREZ

Robotic and Automation Laboratory – COPPE/UFRJ. Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ Mechatronics and Automation Laboratory - UNAB. e-mail: [olengerke@ufrj.br](mailto:olengerke@ufrj.br)

### DEYANIRA DÍAZ DÍAZ

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
[deyaniradiazdiaz@gmail.com](mailto:deyaniradiazdiaz@gmail.com)

### JOSÉ NELSON PÉREZ CASTILLO

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
[jnperezcc@gmail.com](mailto:jnperezcc@gmail.com)

### ALEXÁNDER GUZMÁN VÁSQUEZ

Magíster en administración, administrador de empresas. Estudiante del Doctorado en Administración, Facultad de Administración, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Correo: [ale-guzm@uniandes.edu.co](mailto:ale-guzm@uniandes.edu.co)

### MARÍA ANDREA TRUJILLO DÁVILA

Magíster en administración, ingeniera sanitaria. Profesora e investigadora. Facultad de Administración. Universidad del Rosario. Estudiante del Doctorado en Administración, Facultad de Administración, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Correo: [maria.trujilloda@urosario.edu.co](mailto:maria.trujilloda@urosario.edu.co)

### GISELE EUGENIA BECERRA PLAZA

Magíster en administración, administradora de empresas. Decana, Facultad de Administración, Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia. Correo: [gbecerra@escuelaing.edu.co](mailto:gbecerra@escuelaing.edu.co)

### MANUELA TRUJILLO DÁVILA

Contadora pública. Sales Manager. Insurance Express. Correo: [mtrujild@une.net.co](mailto:mtrujild@une.net.co)

### CARLOS LEONARDO QUINTERO ARAÚJO

Ingeniero industrial de la Pontificia Universidad Javeriana. Especialista en Desarrollo y Gerencia Integral de Proyectos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. M.Sc. en optimización y seguridad de sistemas en la Universidad de Tecnología de Troyes, Francia. Actualmente se desempeña como director del Centro de Estudios de Optimización de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. [cquinter@escuelaing.edu.co](mailto:cquinter@escuelaing.edu.co)

### DIANA MERCEDES RODRÍGUEZ COCA

Actualmente es profesor asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, Bogotá, 2006. Ingeniero Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 2000.

### ANDRÉS MEDAGLIA

Actualmente es profesor asociado de la Universidad de los Andes. Postdoctorado, North Carolina State University, Estados Unidos 2002. Ph.D. in Operations Research, North Carolina State University, Estados Unidos 2001. Magíster en Ingeniería Industrial, Universidad de los Andes, Bogotá, 1995. Ingeniero Industrial, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 1992.

---

---

## EVALUADORES PARA ESTE NÚMERO

---

### GILBERTO AREIZA PALMA

Ingeniero civil. Profesor titular de la Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.

### JAVIER BOTERO ÁLVAREZ

Director de la Oficina de Desarrollo Institucional de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y director científico de la Revista.

### PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA

Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Maestría en ingeniería civil de la Universidad de los Andes. Ph.D. University of Texas at Austin. Profesor asociado y director del Centro de Estudios de Estructuras, Materiales y Construcción de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y director de la especialización en estructuras.

### GERARDO OSPINA HERNÁNDEZ

Ingeniero de sistemas y computación. Profesor asistente de la Facultad de Ingeniería de Sistemas de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

### FELIPE CÁRDENAS TAMARA

Director del Programa de Medicina Social de la Fundación Centir.

### ANTONIO VELASCO

Matemático y estadístico de la Universidad Nacional de Colombia. Decano de la Facultad de Matemáticas de la Fundación Universitaria Konrad Lorenz.

---

---