



- **Análisis comparativo de costos para un proyecto de construcción de hotel y oficinas con certificación LEED en la ciudad de Bogotá.**
- **Modelación, construcción y seguimiento de obras, sitio inestable El Cune.**
- **Cloud storage aplicado en la gestión de la calidad y manejo de documentos en laboratorios científicos.**
- **Determination of biochemical and physical conditions of plastics demominated as “biodegradable” subjected to anaerobic conditions.**
- **Preparación de pedidos eficiente en el centro de distribución utilizando VRP.**
- **Especial 40 años**
- **NOTICIAS**  
**Medalla Antonio María Gómez**

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

# Ingeniería

88



Octubre - Diciembre de 2012

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000.00



Publicación admitida por Colciencias en el Índice Nacional de Publicaciones Seriadas, Científicas y Tecnológicas colombianas - Publindex - Clasificación tipo C  
Publicación incluida en Ulrichweb.com™  
Tarifa postal reducida No. 2012-107  
4-72 la Red Postal de Colombia  
Vence 31 de diciembre de 2012

## CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**PRESIDENTE** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS

**VOCALES** MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ  
SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ  
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI  
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ  
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS  
EDUARDO SILVA SÁNCHEZ  
JAIRO URIBE ESCAMILLA  
OSWALDO CASTILLO NAVETTY  
(Representante de los profesores)  
JAVIER FELIPE CANO SUÁREZ  
(Representante de los estudiantes)

**RECTOR** ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ

**SECRETARIO** RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

## REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**DIRECTOR** JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

**COMITÉ EDITORIAL** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS  
CLAUDIA RÍOS REYES  
PAULA XIMENA RÍOS REYES  
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ  
RICARDO SALAZAR FERRO  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

**DIRECCIÓN EDITORIAL** CRISTINA SALAZAR PERDOMO

**EDICIÓN** **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**  
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA  
**CORRECCIÓN DE ESTILO**  
ELKIN RIVERA GÓMEZ

**DIRECCIÓN COMERCIAL** EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE AK 45 N.º 205-59  
TEL.: (57 1) 668 3600, EXT. 533  
[revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co)  
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

LA ESCUELA Y LA REVISTA NO SON RESPONSABLES DE LAS IDEAS Y CONCEPTOS EMITIDOS POR LOS AUTORES DE LOS TRABAJOS PUBLICADOS. SE AUTORIZA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE LOS ARTÍCULOS DE LA REVISTA SI SE CITAN LA FUENTE Y EL AUTOR.

# Contenido

## 5 / EDITORIAL

### Cuarenta años

*Ricardo Quintana Sighinolfi*

## 7-13

### **Análisis comparativo de costos para un proyecto de construcción de hotel y oficinas con certificación LEED en la ciudad de Bogotá**

*Gina Alexandra Cabas Rosado, María Camila Garrido Bárcenas, César Orlando Ruiz Rueda y Adriana Gómez Cabrera*

En este trabajo se presenta un análisis del porcentaje de inversión adicional requerido para construir un edificio sostenible en la ciudad de Bogotá, con los estándares de la norma LEED (Leadership in Energy & Environmental Design), sistema de certificación de edificios sostenibles, desarrollado por el US Green Building Council y recientemente implementado en el país, para dar a conocer a futuros constructores el análisis costo-beneficio del desarrollo de este tipo de proyectos.

## 15-34

### **Modelación, construcción y seguimiento de obras, sitio inestable El Cune**

*Juan Carlos Afanador Caicedo y Carlos Ernesto Vargas Aragón*

El sitio inestable El Cune, ubicado en el kilómetro 81 de la vía nacional Bogotá-Honda, en la variante al municipio de Villeta, es el caso histórico de deslizamiento causado por inestabilidad geológica más analizado y discutido en Colombia. Desde 1997 hasta 2008 se hicieron numerosos estudios y algunos trabajos en este movimiento complejo que involucró más de 1.500.000 m<sup>3</sup> en materiales de lutitas y coluviones.

## 35-44

### **Cloud storage aplicado en la gestión de la calidad y manejo de documentos en laboratorios científicos**

*Javier Enrique De la Hoz Freyle, Herman Ramírez Gómez y Luis Carlos Gómez Flórez*

La gestión documental dentro de las organizaciones al incorporar sistemas de gestión de calidad (SGC) conlleva importantes retos debido a las grandes cantidades de información manejadas, así como a la demanda en su confiabilidad, disponibilidad, integridad y confidencialidad. Los laboratorios científicos de análisis de muestras regidos por la norma ISO 17025 no son la excepción, y requieren grandes esfuerzos para manejar los documentos generados por los SGC. *Cloud storage* surge como una alternativa para cubrir las necesidades de la gestión documental.

# Contenido

**45-54**

**Determination of biochemical and physical conditions of plastics denominated as “biodegradable” subjected to anaerobic conditions**

*Lorena I. Albarracín López, Alberto Uribe Jongbloed y J. Alejandro Puentes Parodi*

The main objective of the study was to determine the biochemical and physical conditions of two different types of polymeric materials (HDPE with oxo-additive and PLA) when subjected to conditions similar to those presented inside a sanitary landfill. These materials are commercialized within the country claiming to be biodegradable under certain conditions. However, the conditions in which such degradation may occur are completely unknown from those presented inside a solid waste final disposal site (sanitary landfill).

**55-64**

**Preparación de pedidos eficiente en el centro de distribución utilizando VRP**

*Rodrigo Andrés Gómez Montoya, Abdul Zuluaga Maño y Laura Vélez Calle*

El presente artículo se hizo con la idea de diseñar una estrategia de ruteo para la operación de preparación de pedidos utilizando la técnica VRP con teoría de grafos, buscando que ésta se desarrolle con un enfoque de eficiencia respecto al tiempo y la utilización de recursos. Para alcanzar el objetivo se cubren temas como centros de distribución (Cedi), preparación de pedidos, técnicas de modelamiento de ruteo como VRP y teoría de grafos. Como resultado del artículo, se obtiene una metodología de ruteo de preparación de pedidos eficiente que permitió reducir el tiempo en 12,5 minutos respecto a la estrategia actual, lo cual impacta en la eficiencia del Cedi.

**65 / ESPECIAL 40 AÑOS**

**Escuela Colombiana de Ingeniería 1972-2012**

**75 / NOTICIAS**

**Medalla al Mérito Académico Antonio María Gómez**

**77 / ALCANCE Y POLÍTICAS**

# Editorial

## Cuarenta años

**RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI**

Fundador de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ricardo.quintana@escuelaing.edu.co

Han pasado cuarenta años de una labor continua, dedicada, sin descanso, desde el día en que un grupo de profesores, con el apoyo valioso de varios empresarios importantes de Bogotá, firmó el acta de constitución de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Para varios de nuestros compañeros de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, de donde veníamos todos los profesores, era una locura que nos iba a perjudicar en nuestra carrera, porque el proyecto sería un rotundo fracaso.

Al redactar lo que se llamó la Declaración de Principios, que ha sido nuestra guía desde entonces, se sentaron dos precedentes que se han mantenido como los pilares fundamentales en nuestra institución. El primero dice: “Los aspirantes a formarse en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito no podrán ser discriminados por causa alguna distinta de su capacidad y rendimiento académico y de su interés por obtener una formación integral”. Dentro de las posibilidades económicas de la Escuela, que no recibe ninguna ayuda del Estado y muy poca de los particulares, esta decisión se ha mantenido con gran esfuerzo, hasta el punto de que hoy podemos decir con orgullo que les hemos abierto las puertas a una vida digna a más de ocho mil familias que nos han confiado sus hijos para que los formemos como profesionales responsables y ciudadanos de bien. Nos enorgullece saber que un número alto de nuestros egresados hoy son profesionales respetados por sus conocimientos y por su formación académica y ética, tanto en el país como en el exterior.

El segundo pilar que se sentó en la Declaración de Principios reza así: “Que en desarrollo de todas sus actividades, la Escuela Colombiana de Ingeniería mantendrá absoluta independencia frente a todo credo político, social, económico o religioso y, en consecuencia, será ajena a todo interés partidista originado en tales credos”. En esta posición hemos sido firmes, y aunque respetamos las creencias de nuestros alumnos, profesores y empleados administrativos, nos hemos mantenido alejados de las diferencias de opinión que se generen por fuera de nuestras aulas. No ha sido fácil, porque siempre aparecen personas que, con muy buena voluntad, quieren involucrar a la comunidad de la Escuela en actividades que se pueden interpretar como violatorias de nuestro principio fundamental de no intervenir en ninguna disputa partidista de cualquier credo.

En la actualidad, después de cuarenta años de trabajo dedicados a la formación de profesionales integrales, con alta preparación académica y sólidos principios éticos, vemos con satisfacción cómo aquellos que fueron nuestros discípulos y sufrieron los rigores de la exigencia académica siguen nuestros pasos, para bien de la Escuela y de la sociedad colombiana.

Hoy, aquellos soñadores, aquellos locos que íbamos a fracasar y dañar nuestro prestigio profesional, podemos ver los resultados de nuestra “locura” y mirar con confianza el futuro porque la Escuela está en buenas manos, pues quienes fueron nuestros alumnos están asumiendo con responsabilidad y dedicación las labores que se les han encomendado.



# Análisis comparativo de costos para un proyecto de construcción de hotel y oficinas con certificación LEED en la ciudad de Bogotá

## Comparison of cost for a hotel and offices construction with LEED certification in Bogotá

GINA ALEXANDRA CABAS ROSADO<sup>1</sup>, MARÍA CAMILA GARRIDO BÁRCENAS<sup>2</sup>, CÉSAR ORLANDO RUIZ RUEDA<sup>3</sup>, ADRIANA GÓMEZ CABRERA<sup>4</sup>

1. Ingeniera civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

2. Ingeniero civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

3. Ingeniero mecánico de la Universidad de los Andes. Especialista en Mercadeo Estratégico del Colegio de Estudios Superiores de Administración (Cesa). Consultor acreditado LEED. Gerente de operaciones de Setri Sustentabilidad SAS. Miembro fundador y del Consejo Directivo de Fundadores del Consejo Colombiano de la Construcción Sostenible (CCCS).

4. Ingeniera civil de la Pontificia Universidad Javeriana y M.Sc. en Ingeniería Civil de la Universidad de los Andes. Profesora asistente y miembro del grupo de investigación Estructuras y Construcción. Jefa de la sección de construcción del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

g.alexandracabas@gmail.com - mcgarridob@gmail.com - cruz@setri.com.co - adrianagomez@javeriana.edu.co

Recibido: 15/06/2012 Aceptado: 28/06/2012

Disponble en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

En este trabajo se presenta un análisis del porcentaje de inversión adicional requerido para construir un edificio sostenible en la ciudad de Bogotá, con los estándares de la norma LEED (*Leadership in Energy & Environmental Design*), sistema de certificación de edificios sostenibles, desarrollado por el US Green Building Council y recientemente implementado en el país, para dar a conocer a futuros constructores el análisis costo-beneficio del desarrollo de este tipo de proyectos.

Así mismo, se presentan las ventajas que otorga a largo plazo la certificación “Core and Shell”, de acuerdo con la norma LEED versión 3.0-2009, sistema de clasificación para diseñadores, constructores, promotores y propietarios de edificios nuevos que deseen abordar el diseño sostenible solamente en cuanto al núcleo y envolvente del edificio.

Según disposiciones de confidencialidad de los propietarios del proyecto, en esta investigación no se presentarán cifras en pesos, sino en porcentajes de inversión adicional.

**Palabras claves:** construcción sostenible, norma LEED, liderazgo en diseño energético y medioambiental, USGBC (Consejo de la Construcción Ecológica de Estados Unidos).

### Abstract

This work investigates the percentage of additional investment required to build sustainable buildings in Bogotá, under the LEED standard (Leadership in Energy & Environmental Design), and thus promote future builders to build environmentally friendly projects to help mitigate the impacts of this generates industry in the environment. The document emphasizes the advantages of the LEED for Core & Shell, which is a green building rating system for designers, builders, developers and new building owners who want to tackle sustainable design for new core and shell construction system in the long run, both economically and environmentally.

According to the confidentiality provisions of project owners, this research does not show figures in pesos, but only percentages of additional investment.

**Keywords:** sustainable construction, Leadership in Energy and Environmental Design, United States Green Building Council.

## INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción es uno de los principales actores en la problemática ambiental, debido a que los edificios son los responsables de gran parte de las emisiones nocivas a la atmósfera y del consumo de recursos naturales (Castro-Lacouture et ál., 2009); por ejemplo, en Estados Unidos los edificios consumen el 72% del total de la energía eléctrica generada y más del 40% de la energía de primer uso (USGBC, 2011). Adicionalmente, los edificios son la principal fuente de generación de CO<sub>2</sub>, por encima del transporte y la industria (Londoño, 2009).

Desde hace varios años se ha propuesto mitigar esos impactos a través de iniciativas que buscan reducir la afectación al medio ambiente y también mejorar la calidad de vida de los seres vivos. En el área de la construcción, una de estas iniciativas es la construcción sostenible, soportada en sistemas de certificación como la normativa LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), que busca reducir el consumo energético, implementar procesos de construcción sostenible y estimula el uso de materiales renovables (Londoño, 2009).

LEED es una certificación a nivel mundial de tipo voluntario, creada por el USGBC (United States Green Building Council), que se les otorga a los edificios diseñados, construidos y operados atendiendo una normativa, con el objetivo de mejorar el desempeño en los indicadores más importantes: el ahorro de energía, la eficiencia del agua, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, la adecuada utilización de los recursos naturales no renovables y sus impactos, además de la mejora en la calidad del aire y el ambiente en espacios interiores, y la utilización de elementos menos nocivos para la salud de sus ocupantes (USGBC, 2011). Para obtener la certificación se requiere un proceso integrado de diseño y construcción, realizado por profesionales que aportan sus ideas para que los edificios sean ambientalmente amigables, según los estándares de la normativa LEED. La práctica sostenible promueve las eficiencias en el manejo de energía y el uso de productos que son más seguros, renovables, reciclables y reducen desperdicios dañinos en su producción (Villa, 2009), lo cual favorece no solamente al medio ambiente sino también a los habitantes de dicho espacio.

En Colombia, desde hace algunos años se ha venido implementando el concepto de “construcción sostenible”, ya que no sólo beneficia al medio ambiente, sino

también a las personas que lo habitan, porque se ha demostrado que los ocupantes de edificios verdes son más sanos y hasta un 16% más productivos (USGBC, 2011).

El motivo de esta investigación consistió en determinar el índice de inversión adicional que permite la realización de proyectos sostenibles en la ciudad de Bogotá a partir de un caso de estudio, puesto que se espera que el número de proyectos de este tipo vaya en aumento; por lo tanto, es importante para los futuros constructores conocer el monto adicional que deben invertir y las ventajas que obtendrían al ejecutar un proyecto que cumpla con los estándares propuestos por LEED. Las características del proyecto objeto de este estudio es posible observarlas a continuación (tabla 1).

**Tabla 1**  
Ficha técnica del proyecto

Nombre del proyecto	Tierra Firme
Ubicación	Centro Empresarial Santa Bárbara
Área [m <sup>2</sup> ]	62.250
Número de pisos	29
Tipo de edificación LEED	Core and Shell
Certificación a la que aspira	Plata

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proyecto objeto de estudio se consideró en principio sin contemplar la certificación LEED, y el análisis de este trabajo consistió en hallar el índice de inversión adicional que ocasionó la decisión de postular el proyecto para obtener la certificación LEED, categoría plata.

Inicialmente se identificaron los créditos exigidos por la norma LEED que exigieron una inversión adicional. Esta actividad se realizó de acuerdo con el concepto de cada uno de los involucrados en el proyecto, quienes son los encargados de determinar las estrategias que hay que implementar para cumplir el estándar. Posteriormente se estudió el presupuesto y se hicieron los correspondientes análisis de precios unitarios (APU) para identificar los ítems que se relacionaban con cada uno de los créditos.

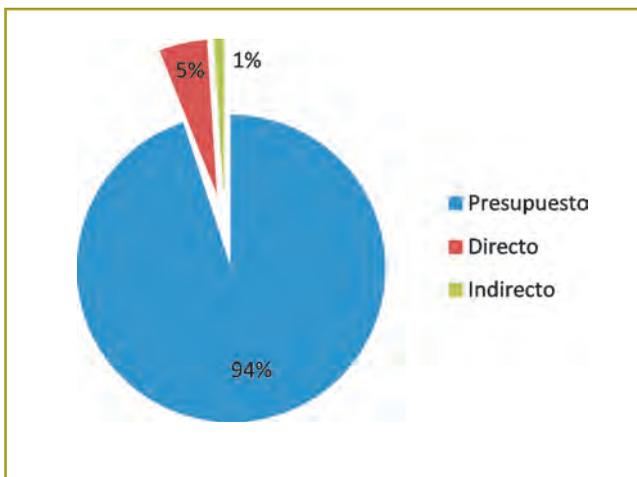
Igualmente, se analizaron los costos indirectos del proyecto y su incidencia en el presupuesto con la inclusión del factor LEED en éste.

Los resultados finales señalan que el índice de inversión adicional es de 6,31% sobre el valor total del presupuesto del proyecto (gráfico 1).



**Gráfico 1.** Índice de inversión adicional total.

A renglón seguido se observa cómo se distribuye el índice de inversión total entre costos directos e indirectos sobre el presupuesto total del proyecto. Se evidencia cómo los costos directos tienen una incidencia mayor, del orden del 5,25%, en comparación con los costos indirectos, los cuales representan el 1,15% del total (gráfico 2).

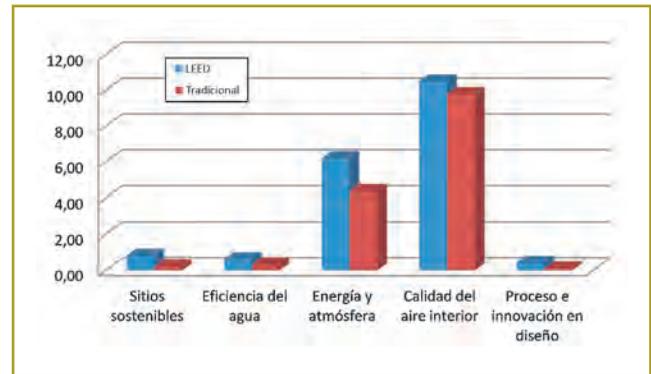


**Gráfico 2.** Índice de inversión adicional total discriminado.

### Análisis de costos directos

En el estudio se incluyó el análisis de costos directos del proyecto sin contemplar los requisitos de la norma LEED y posteriormente tomando en cuenta la inversión adicional para acceder a la certificación. Los resultados

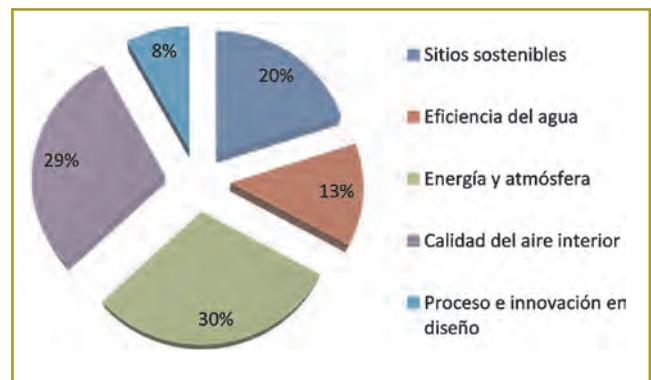
por capítulos de la norma LEED se reflejan a continuación (gráfico 3).



**Gráfico 3.** Comparación de la inversión LEED frente a la tradicional por capítulos del estándar.

Cabe señalar que al comparar una inversión LEED, no se observan diferencias superiores al 1,54% por capítulo, lo cual resulta una cifra alentadora para los nuevos constructores, ya que la inversión es relativamente baja en comparación con los beneficios que se obtendrán a mediano y largo plazo.

Respecto a la distribución del índice de inversión generado por cada uno de los capítulos de la norma LEED en los costos directos del presupuesto del proyecto, se encontró que las mayores inversiones se requieren en los capítulos relacionados con calidad en el aire interior y energía y atmósfera, puesto que hay que importar nuevas tecnologías para el alcance de éstos, dado que los equipos requeridos no se fabrican en el país (gráfico 4).



**Gráfico 4.** Distribución del índice de inversión en costos directos según cada capítulo LEED.

Más adelante se presenta el análisis detallado de los costos generados por cada uno de los capítulos de la norma LEED y cada uno de sus créditos que produjeron inversión adicional. Se incluyen los ítems del estándar que generaron porcentajes adicionales de inversión en costos directos y se indica su magnitud, expresada en porcentaje del total de inversión adicional (tabla 2).

En el capítulo “Sitios sostenibles”, el ítem que ocasionó una mayor inversión adicional fue la adecuación de las terrazas y cubiertas verdes, valor que se encuentra distribuido entre los créditos de protección o restauración del hábitat, maximización de zonas verdes y efecto islas de calor en cubiertas.

En el capítulo “Eficiencia del agua”, a pesar de necesitar el doble de red para el suministro del agua tanto

potable como reciclada, no se aumentan los costos radicalmente debido a que todas las redes requieren diámetros más pequeños que los tradicionales.

Respecto al capítulo “Energía y atmósfera”, la reducción del consumo energético incrementó de manera considerable el valor por requerir la instalación de vidrios en las fachadas de alta tecnología, los cuales son capaces de filtrar las ondas de luz y no transmitir las ondas de calor.

En el capítulo “Materiales y recursos” se especifica el uso de material reciclable, materiales de la región y manejo de desechos durante la construcción, los cuales son ítems que generan ahorros, porque actualmente se busca promover el uso de materiales ecológicos y de la región, lo cual disminuye las emisiones generadas por su

**Tabla 2**  
Análisis de costos directos

Capítulo	Crédito		Índice
<b>CAPÍTULO “SITIOS SOSTENIBLES”</b>			
SS	PRERREQUISITO 1	Prevención de polución durante la construcción.	0,01%
SS	CRÉDITO 5.1	Protección o restauración del hábitat.	0,22%
SS	CRÉDITO 5.2	Maximización de zonas verdes.	0,30%
SS	CRÉDITO 6.1	Diseño para aguas lluvias-control de cantidad.	0,08%
SS	CRÉDITO 6.2	Diseño para aguas lluvias-control de calidad.	0,05%
SS	CRÉDITO 7.1	Efecto islas de calor-no techos.	0,00%
SS	CRÉDITO 7.2	Efecto islas de calor-cubiertas.	0,30%
SS	CRÉDITO 8	Reducción de contaminación lumínica nocturna.	0,10%
<b>TOTAL SITIOS SOSTENIBLES</b>			<b>1,05%</b>
<b>CAPÍTULO “EFICIENCIA DEL AGUA”</b>			
WE	PRERREQUISITO 1	Reducción del uso del agua potable.	0,14%
WE	CRÉDITO 1	Eficiencia de agua en jardines.	0,14%
WE	CRÉDITO 2	Innovación en el manejo de aguas residuales.	0,15%
WE	CRÉDITO 3	Reducción de consumo de agua potable.	0,23%
<b>TOTAL EFICIENCIA DEL AGUA</b>			<b>0,65%</b>
<b>CAPÍTULO “ENERGÍA Y ATMÓSFERA”</b>			
EA	PRERREQUISITO 2	Consumo mínimo de energía	1,31%
EA	CRÉDITO 5.1, 5.2	Medición y verificación de edificio base.	0,29%
<b>TOTAL ENERGÍA Y ATMÓSFERA</b>			<b>1,60%</b>
<b>CAPÍTULO “CALIDAD EN EL AMBIENTE INTERIOR”</b>			
IEQ	CRÉDITO 6.1	Control de sistemas de iluminación.	0,10%
IEQ	CRÉDITO 6.2	Controles de sistemas de confort térmico.	0,14%
IEQ	CRÉDITO 8.1	Iluminación natural.	0,00%
IEQ	CRÉDITO 8.2	Vista exterior.	1,31%
<b>TOTAL CALIDAD EN EL AMBIENTE INTERIOR</b>			<b>1,54%</b>
<b>CAPÍTULO “INNOVACIÓN Y DISEÑO”</b>			
ID	CRÉDITO 2	Profesional acreditado LEED.	0,40%
<b>TOTAL PROCESO E INNOVACIÓN EN DISEÑO</b>			<b>0,40%</b>
<b>TOTAL</b>			<b>5,25%</b>

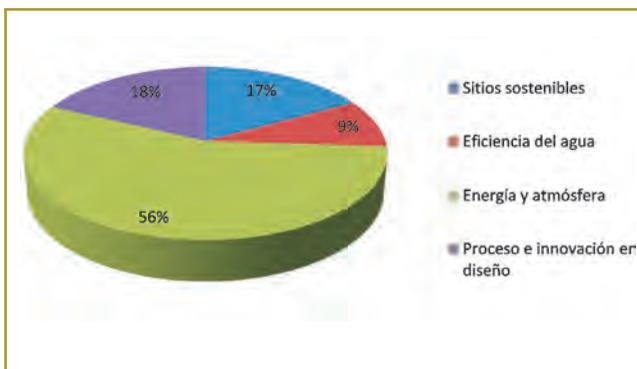
transporte. Ningún prerequisite o crédito incrementa el presupuesto en este ítem.

Con respecto al capítulo “Calidad del ambiente interior”, los costos más elevados se encuentran en la generación de vista exterior. Esto se debe a que la fachada tiene un alto porcentaje de incidencia en un presupuesto tanto LEED como tradicional, en comparación con los demás ítems que lo componen, y como se planteó en el capítulo “Energía y atmósfera”, el vidrio debe cumplir con una serie de características para satisfacer los estándares LEED y proveer confort y ahorro de energía.

El capítulo final, “Innovación y diseño”, genera puntos adicionales para la certificación. En el caso en estudio, se requirió una inversión adicional para contar con la asesoría de profesionales LEED, debido a que los propietarios decidieron tener el apoyo de más profesionales que los requeridos por la norma, con el fin de que aportaran en la concepción y el diseño del edificio.

### Análisis de costos indirectos

Los costos indirectos más representativos están contenidos en el capítulo “Energía y atmósfera”, alcanzando un 56% del índice de inversión de costos indirectos. Involucran el Commissioning International, unión de profesionales que realizan la modelación energética. Para este proyecto en particular se involucró a un profesional nacional y a uno extranjero, así como a un asesor externo LEED con experiencia en proyectos de esta magnitud. El análisis de la generación de costos indirectos por capítulos de la norma LEED se presenta seguidamente (gráfico 5):



**Gráfico 5.** Distribución del índice de inversión de costos indirectos según cada capítulo LEED.

Más adelante se hace un análisis por ítems de la norma que generaron porcentajes adicionales de inversión en costos indirectos y se indica su magnitud, expresada en porcentaje del total de inversión adicional.

En cuanto a sitios sostenibles, las guías de diseño y construcción para arrendatarios las realiza un profesional acreditado LEED; esto se considera una inversión externa que se contempla en los costos indirectos del proyecto, siendo el ítem que más influencia tiene en el capítulo.

En lo que respecta al capítulo “Eficiencia del agua”, el costo indirecto relacionado es el diseño hidrosanitario.

La interventoría o *commissioning* en el sistema de energía es uno de los costos indirectos más elevados en un proyecto LEED, en este caso el 0,57% del índice de inversión adicional, puesto que ayuda a definir las pautas que hacen que un edificio sea sostenible. Esta asesoría abarca tanto los equipos como un acompañamiento continuo a los diseñadores y propietarios del proyecto, con el propósito de alcanzar la certificación LEED y verificar que se cumplan las metas propuestas, en la etapa inicial del proyecto. En este caso se requirió la asesoría de dos empresas: una nacional, que permitiera un acompañamiento presencial a los profesionales involucrados en el proyecto, y otra extranjera, que contara con la experiencia de haber manejado proyectos de magnitud similar.

El costo indirecto del profesional acreditado LEED pertenece a los asesores de la USGBC y a los modeladores energéticos extranjeros. Su incidencia en el capítulo es del 0,03% sobre el valor del índice del 1,15%. Por otro lado, el proceso de innovación es el costo del diseño hidrosanitario que se premia dos veces tanto en el capítulo “Eficiencia del agua”, como en éste.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los edificios basados en los estándares LEED deben tener un diseño integrado, en el que se promueva un uso responsable de los recursos naturales, además de la integración de varios factores que complementan la edificación.
- Gracias al proceso de diseño integrado es posible mejorar la calidad del producto final, en el que a diferencia de un proyecto tradicional se disminuyen los vacíos de comunicación entre los diseñadores, ya

**Tabla 3**  
Análisis de costos indirectos

Capítulo	Crédito		Índice
<b>CAPÍTULO "SITIOS SOSTENIBLES"</b>			
SS	CRÉDITO 5.1	Protección o restauración del hábitat.	0,01%
SS	CRÉDITO 5.2	Maximización de zonas verdes.	0,01%
SS	CRÉDITO 6.1	Diseño para aguas lluvias-control de cantidad.	0,03%
SS	CRÉDITO 7.2	Efecto islas de calor-cubiertas.	0,01%
SS	CRÉDITO 8	Reducción de contaminación lumínica nocturna.	0,00%
SS	CRÉDITO 9	Guías de diseño y construcción para arrendamientos.	0,13%
<b>TOTAL SITIOS SOSTENIBLES</b>			<b>0,19%</b>
<b>CAPÍTULO "EFICIENCIA DEL AGUA"</b>			
WE	PRERREQUISITO 1	Reducción del uso del agua potable.	0,03%
WE	CRÉDITO 1	Eficiencia de agua en jardines.	0,03%
WE	CRÉDITO 2	Innovación en el manejo de aguas residuales.	0,00%
WE	CRÉDITO 3	Reducción de consumo de agua potable.	0,03%
<b>TOTAL EFICIENCIA DEL AGUA</b>			<b>0,09%</b>
<b>CAPÍTULO "ENERGÍA Y ATMÓSFERA"</b>			
EA	PRERREQUISITO 1	Interventoría en el sistema de energía.	0,57%
EA	CRÉDITO 1	Optimización del diseño energético.	0,07%
<b>TOTAL ENERGÍA Y ATMÓSFERA</b>			<b>0,65%</b>
<b>CAPÍTULO "INNOVACIÓN Y DISEÑO"</b>			
ID	CRÉDITO 2	Profesional acreditado LEED.	0,20%
<b>TOTAL PROCESO E INNOVACIÓN EN DISEÑO</b>			<b>0,20%</b>
<b>TOTAL</b>			<b>1,15%</b>

que todos se encuentran al tanto de las actividades propias de cada área profesional.

- La certificación LEED para edificaciones incrementa el valor inmobiliario del proyecto, puesto que se garantiza al cliente un diseño integrado y se pueden visualizar ahorros importantes en el consumo de agua y energía, los cuales son factores cuantificables.
- La certificación LEED para edificaciones también genera un aumento en la vida útil de los equipos, ya que al ser diseñados de acuerdo con las cargas reales de los sistemas y se programe una adecuada operación y mantenimiento, se genera una mayor duración de éstos.
- La reducción de los costos operacionales en el sector energético e hidráulico beneficia al medio ambiente por la disminución en la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y el consumo de recursos naturales, tales como el agua potable.
- Las edificaciones LEED también incrementan el confort, productividad y salud de los ocupantes, la exigencia de una renovación constante del aire y

garantizan una temperatura de confort; además, se reduce el número de agentes contaminantes típicos de los espacios ocupados por un número importante de personas, y se generan beneficios como reducción de enfermedades y aumento de la productividad de los ocupantes.

- El diseño integrado ha probado ser la mejor estrategia para obtener la inclusión exitosa de conceptos verdes, con un impacto positivo en términos económicos, sociales y medioambientales.
- La realización de un proyecto LEED en Bogotá es más económica en comparación con ciudades que estén afectadas por climas con altas variaciones en la temperatura, por lo que los requerimientos de aire acondicionado o calefacción son muy bajos, disminuyendo la inversión en ítems relacionados con la ventilación mecánica porque se puede complementar o remplazar con ventilación natural.
- La normativa colombiana relacionada con construcción y ambiente tiene en algunos casos apartes más estrictos que la norma LEED, lo cual permite

concluir que el incumplimiento de la ley se debe al desconocimiento de ésta por parte de los constructores, y a la falta de entes gubernamentales que velen por su acatamiento; de igual manera, la difusión de las leyes colombianas debe ser más eficaz y compacta, permitiendo así su fácil cumplimiento.

- Con esta investigación se demostró que la realización de proyectos LEED es viable económicamente y sobre todo favorable para el planeta, por lo cual se invita a la consideración de este tipo de edificaciones en Colombia y demuestra que no es exclusiva de pocos.
- La norma LEED cuenta con una serie de estímulos para alentar a los constructores a generar ahorros

importantes en los indicadores relacionados con agua y energía, por lo que en algunos casos parece que se repitieran algunos créditos, pero en sí es un indicador que premia el esfuerzo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castro-Lacouture, D. et ál. (2009). Optimization model for the selection of materials using a LEED-based green building rating system in Colombia. Available at: [consultado el 5 de marzo de 2011].

Londoño, J.C. (2009). *Un edificio verde es un edificio inteligente*. Enero-junio, 4(1), 16.

USGBC (2011). USGBC: U.S. Green Building Council. Available at: <http://www.usgbc.org/> [consultado el 13 de marzo de 2011].

Villa, F. (2009). Construcciones verdes. *Alarife, revista de arquitectura*, 16.



# Modelación, construcción y seguimiento de obras, sitio inestable El Cune

## Modeling, construction and monitoring of corrective works, El Cune landslide

JUAN CARLOS AFANADOR CAICEDO<sup>1</sup>, CARLOS ERNESTO VARGAS ARAGÓN<sup>2</sup>

1. Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería; magíster en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (Unam); consultor en geotecnia y pavimentos; gerente general de Geotecnia y Cimentaciones.

2. Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia; especialista en Ingeniería de Pavimentos de la Universidad Católica de Colombia; magíster en Ingeniería Civil y Geotecnia de la Pontificia Universidad Javeriana; gerente técnico de Geotecnia y Cimentaciones. Grupo de investigación Geotecnia & Cimentaciones S.A.

Recibido: 18/06/2012 Aceptado: 15/07/2012

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

El sitio inestable El Cune, ubicado en el kilómetro 81 de la vía nacional Bogotá-Honda, en la variante al municipio de Villeta, es el caso histórico de deslizamiento causado por inestabilidad geológica más analizado y discutido en Colombia. Desde 1997 hasta 2008 se hicieron numerosos estudios y algunos trabajos en este movimiento complejo que involucró más de 1.500.000 m<sup>3</sup> en materiales de lutitas y coluviones. Finalmente, la Concesión Sabana de Occidente encargó en 2008 al Consorcio Túnel Falso del Cune (Geotecnia y Cimentaciones S.A. y Pedelta S.A.) el diseño definitivo de las obras de solución a esta inestabilidad. Se describen en este artículo las etapas de modelación, construcción y seguimiento del túnel falso, así como las lecciones adquiridas a lo largo de la gestión en sus diferentes etapas.

**Palabras claves:** grandes deslizamientos, lutita, túnel falso, instrumentación geotécnica, caso histórico-geotécnico.

### Abstract

El Cune landslide on the k81 of the national road in the link road to Villeta downtown is the landslide historic case caused by geological instability most analyzed and discussed in Colombia. Since 1997 to 2008 had been developed studies and some works in this complex movement of more than 1.500.000 m<sup>3</sup> in shales and colluviums. In 2008, Concesión Sabana de Occidente contract with the Consorcio Túnel Falso of El Cune (Geotecnia y Cimentaciones S.A and Pedelta S.A) the final design of the corrective works for this landslide. This paper describes the phases of modeling, construction and monitoring of the gallery and the lessons learned in the management of the different phases.

**Keywords:** large landslides, shales, gallery, geotechnical instrumentation, case history geotechnical.

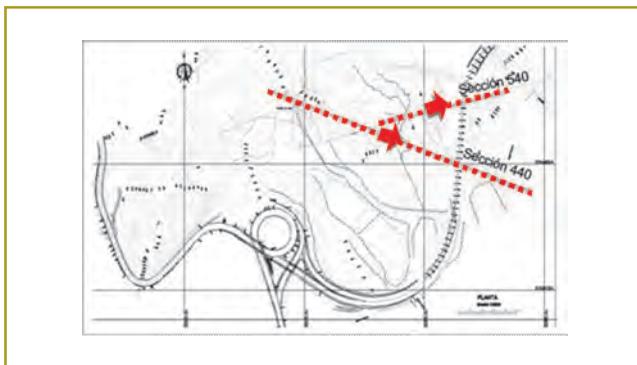
## INTRODUCCIÓN

El sitio conocido como El Cune, localizado entre el K80+910 y el K81+110 de la vía Honda - Villeta - Tobiagrande - Bogotá, ruta 50, tramo 5008, ha sido objeto de estudio desde el año 1999, por ser una zona de alta inestabilidad, con un movimiento que abarca un volumen del orden de 1,5 millones de m<sup>3</sup> que ha afectado principalmente la funcionalidad de la vía.

El primer proceso de inestabilidad reportado se produjo a comienzos del año 1995, casi al finalizar la construcción de la vía, y estuvo activo hasta el año 2008. Desde esa fecha, se habían efectuado varias intervenciones tanto exploratorias como a manera de obras de mitigación, pero sin presentar resultados satisfactorios a largo plazo.

En el año 2008, la Concesión Sabana de Occidente (CSO) contrató al Consorcio Túnel Falso, conformado por las firmas Geotecnia & Cimentaciones S.A. y Pedelta Sociedad Limitada, para el diseño geotécnico y estructural, así como el acompañamiento en la ejecución de las obras de mitigación, que en términos generales correspondieron a la construcción de un túnel falso, terraceo y manejo de aguas, para dos secciones de movimiento definidas así:

- **Sección 440.** Esta sección corresponde a un movimiento de falla en bloque que generó el levantamiento de la banca. La superficie de falla se encuentra a una profundidad del orden de 25 m.
- **Sección 540.** El movimiento corresponde a un flujo de tierras cuya zona de falla se encuentra en el coluvión.



**Figura 1.** Localización general de las principales secciones de movimiento.

Dada la complejidad del fenómeno de remoción se estableció, además, un riguroso programa de seguimiento a la estabilidad, en cada una de las etapas del proceso constructivo, con el fin de tomar las medidas requeridas para el éxito en la ejecución de las obras.

## LOCALIZACIÓN

La vía Bogotá-Siberia-El Vino-La Vega-Villeta se encuentra en el departamento de Cundinamarca, en la región central del territorio colombiano. El sector en estudio se localiza en inmediaciones del casco urbano del municipio de Villeta en un tramo recto, antes de llegar al puente sobre la quebrada El Cune, entre el K80+910 y el K81+110 referenciados al abscisado final establecido por la CSO.



**Figura 2.** Localización del proyecto.

## ETAPA DE DISEÑO

### Trabajo de campo y laboratorio



**Figura 3.** Vista del deslizamiento El Cune, a partir de fotografías aéreas.

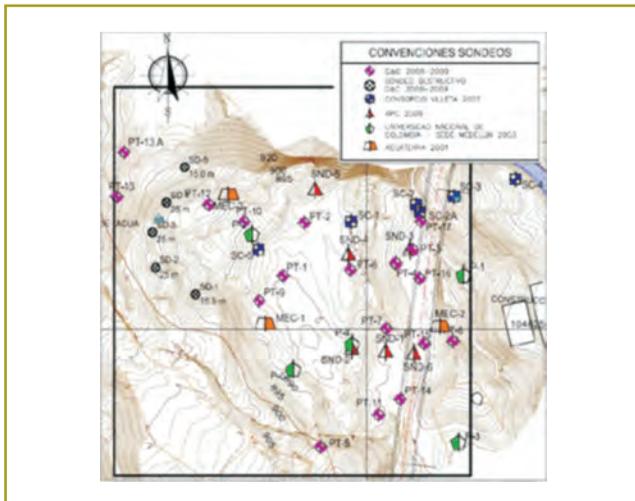
En el año 2008 se hizo el levantamiento topográfico de la zona, con curvas de nivel cada metro, y se tomaron fotografías aéreas en dos planes de vuelo, con lo que se obtuvieron 71 imágenes.

La exploración directa correspondió a 18 perforaciones en 734,1 m; 625,5 m de éstos con profundidades hasta de 50 m, pudiendo con esta longitud identificar por primera vez la superficie de falla, a diferencia de sondeos para estudios anteriores entre los que se encuentran los siguientes:

**Tabla 1**  
Resumen de exploración directa de otros estudios

Firma	Perforación total (m)	Rango de exploración (m)
Consortio Villeta, 2007	112,3	13,5-23,1
APC, 2005	203,2	23,2-50
Universidad Nacional, sede Medellín, 2003	173	21-50
Acuaterra, 2001	64,5	29-24,5

En la siguiente figura se puede observar la distribución de toda la exploración directa que se efectuó en el sitio, hasta el año 2008:



**Figura 4.** Localización de perforaciones para exploración directa.

Con la exploración se pudo identificar la presencia de los siguientes materiales: relleno de lutita, material coluvial y lutita en diferentes calidades. Para éstos se hicieron ensayos de caracterización y en la roca se registraron recobro y RQD.

Los ensayos efectuados se resumen a continuación:

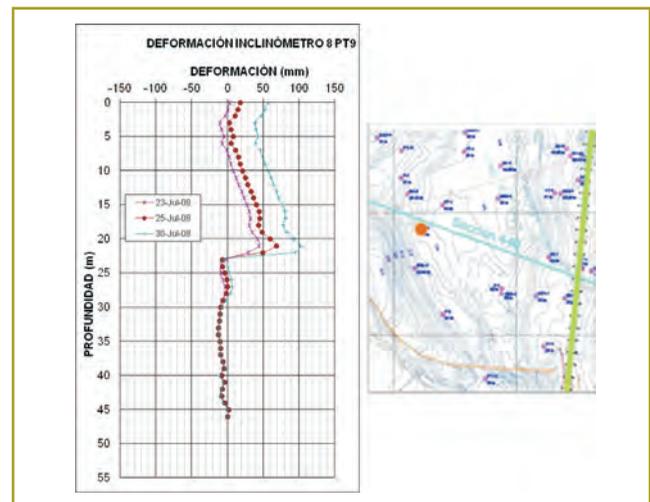
Permeabilidad tipo Lugeon	27
Humedades	163
Límites de Atterberg	163
Granulometría	163
Compresión inconfina	36
Corte directo	34
Análisis de agua	3

En algunas de las perforaciones se instalaron instrumentos para determinar la dirección y velocidad aproximada del movimiento, así como los niveles freáticos y presión del agua.

Se colocaron doce inclinómetros con profundidades entre 30 y 50 m, para un total de 449,5 m de longitud; siete piezómetros Casagrande con profundidades entre 15 y 40 m para 180 m de longitud, y cinco piezómetros de hilo vibrátil con profundidades entre 10 y 30 m, en 110 m de longitud.

A partir del monitoreo de inclinómetros se pudo concluir lo siguiente:

- El movimiento principal, denominado sección 440, se encuentra a 25 m de profundidad. Es el primer estudio que determina la superficie de falla del movimiento principal.



**Figura 5.** Inclinómetro 8. Comportamiento y localización.

- El cerro del costado oriental NO está afectado por el movimiento principal y lo confina en esa dirección (figura 6: Inclinómetro 7).



Figura 6. Inclinómetro 7: Comportamiento y localización.

- Más allá de la falla sur, el movimiento principal no existe (figura 7: Inclinómetro 5).

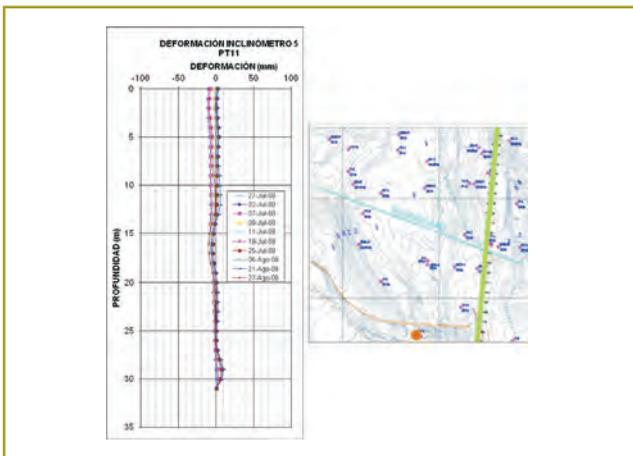


Figura 7. Inclinómetro 5: Comportamiento y localización.

El seguimiento a las lecturas de los piezómetros indica lo siguiente:

- Existen niveles de aguas artesianas, es decir, con presiones o cabezas hidráulicas totales mayores que las de un nivel piezométrico normal.
- La condición de la masa de suelo en general es saturada, con la presencia de un acuífero inferior.

En cuanto a exploración indirecta, se realizaron 605 metros de líneas de refracción sísmica, distribuidas en 11 líneas de 55 metros de longitud.

También se efectuaron 18 sondeos eléctricos verticales y dos ensayos de velocidad de onda tipo *Down-Hole* de 45 y 33 m, respectivamente.

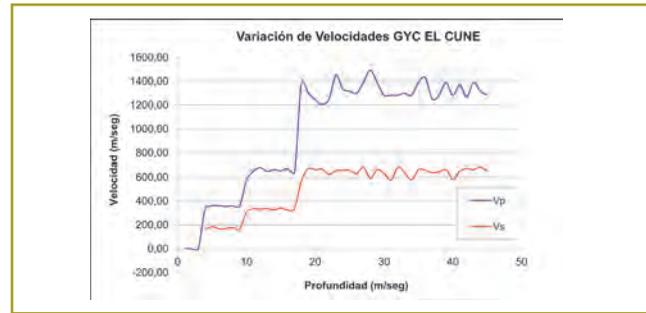


Figura 8. Velocidades obtenidas mediante ensayo *Down-Hole*.

### Velocidades de onda

De estos análisis, así como de los resultados de los perfiles sísmicos, cabe destacar la presencia de una singularidad geofísica que describe una especie de batea, que coincide con la zona de falla y la forma que representa el mecanismo del movimiento principal, que aparece en la sección de análisis 440.

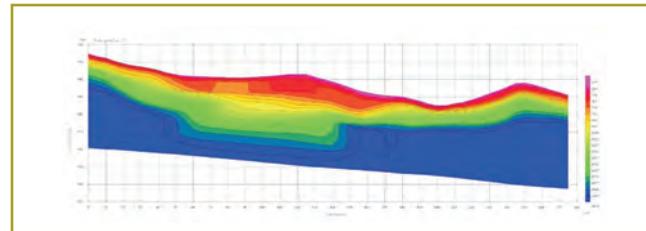


Figura 9. Perfil unificado a partir de exploración geofísica.

### Geología

En la región se presenta una secuencia sedimentaria de rocas lodosas con edad cretácea, constituida por lodolitas y limolitas que conforman la parte inferior del Grupo Villeta, expuestas en el flanco occidental de la cordillera Oriental y comprendida estructuralmente en el núcleo del anticlinorio de Villeta. El Grupo Villeta corresponde a un término estratigráfico atribuido a Hettner (1892), nombrado más tarde por otros geólogos, como Cáceres & Etayo (1969), quienes reconocen para la zona de influencia del terreno involucrado en los procesos de inestabilidad del río Cune, la formación Trincheras (Kitr) en la base de este grupo, la cual infrayace la formación Socotá (Kis) y superyace las formaciones Útica (Kiut) y Murca (Kim).

En la zona del deslizamiento, dentro de la formación Trincheras (Kitr), se han reconocido cuatro fallas geológicas debidas a la extensión hacia el oriente de los sistemas de falla descritos dentro del núcleo del anticlinorio:

- **Falla Oriental.** Es una falla que desplaza rocas de la formación Trincheras en la base de la zona inestable a lo largo de la carretera destruida, separando roca muy fracturada y cizallada (occidente), de roca relativamente sana y estable (oriente).
- **Falla Norte.** Esta falla se reconoce por el fuerte contraste morfológico del cerro donde está fundado el estribo izquierdo del puente sobre la quebrada El Cune.
- **Falla Occidental.** Se manifiesta con cataclasis severa, precipitación de yeso y de calcita, en un ancho de 100-120 m y profundidad de más de 40 m. Pone en contacto las rocas de la formación Trincheras con las de la formación Arenisca de Útica.
- **Falla Sur.** Esta estructura se ha definido en la parte sur del área de estudio. Se trata de una falla transversal con orientación NW, que delimita la zona inestable por el costado sur, con extensión progresivamente mayor desde la parte alta.



Figura 10. Localización de fallas.

### Modelo hidrogeológico

La firma Hidrogeolcol fue la encargada de hacer el modelo hidrogeológico del sitio, análisis del cual se pudo concluir lo siguiente:

- Las condiciones que mejor representan la recarga de esta zona son de dos tipos: la primera relacionada con la infiltración en la zona superior y la segunda mediante flujo vertical ascendente, proveniente de horizontes fracturados de la formación Trincheras, cuya recarga proviene fuera de la zona de estudio.
- La formación Trincheras desarrolla un acuífero multicapa semiconfinado de pobre capacidad de almacenamiento, con desarrollo local de porosidad secundaria por fracturamiento. El semiconfinamiento lo origina el depósito inestable que le suprayace, el cual produce una recarga vertical por la presencia de un grueso paquete poco permeable que origina un goteo cuando el citado acuífero es sometido a bombeo.
- Las concentraciones de ion sulfato en el agua subterránea se encuentran entre 1390 y 2177 mg/l. El origen de los sulfatos es la disolución de yeso, cuya solubilidad aumenta con el contenido de sales en el agua y ligeramente con la temperatura (hasta 58 °C). El yeso puede ser disuelto por los flujos verticales ascendentes a través de las fracturas, con un tiempo de contacto suficiente para que los iones Ca y SO<sub>4</sub> entren en solución en el agua.

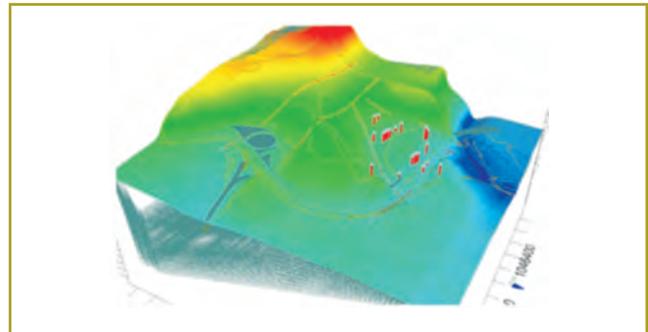


Figura 11. Red de diferencias finitas para modelación del flujo.

### Modelo geológico - geotécnico

Mediante la interpretación de los registros de perforación, los resultados de la instrumentación, la información de los estudios geofísicos y los estudios anteriores, se planteó el modelo geotécnico de las secciones 540 y 440, que describen los dos movimientos principales. Los modelos planteados contienen los siguientes materiales:

- **Relleno de lutita:** relleno de origen antrópico dispuesto durante las actividades de movimientos de tierras. Conformados por lutitas color negro de humedad baja a media, plasticidad media a alta y consistencia blanda a media. Su espesor se encuentra entre 5 y 30 m.
- **Coluvión:** depósitos de ladera de color café. Humedad media a alta, plasticidad nula a alta, consistencia muy blanda a medio firme. Se encuentra en espesores de 5 a 15 m.
- **Lutita muy mala cizallada:** roca lodosa con evidencias de rotura, muy baja calidad y presencia de zonas de brecha. RQD: <25%.
- **Lutita mala:** roca lodosa de muy baja calidad. RQD: 25-50%
- **Lutita media:** roca lodosa de calidad media. RQD: 50-75%.
- **Lutita buena a muy buena:** roca lodosa de calidad alta. RQD: >75%.
- **Lutita muy mala no cizallada:** roca lodosa de calidad muy mala. RQD: <25%.

Las secciones en estudio se pueden describir de la siguiente manera:

#### Sección 440

Esta sección corresponde a un corte estratigráfico típico que describe el movimiento principal y de mayor complejidad, que causó el levantamiento de la banca. El mecanismo de falla asumido corresponde a un movimiento en bloque, en el cual el bloque que se encuentra en la zona central se desliza por una zona de falla en lutita cizallada sobre materiales de igual origen pero de mayor calidad. La superficie de falla se halla a una profundidad entre 25 y 35 m.

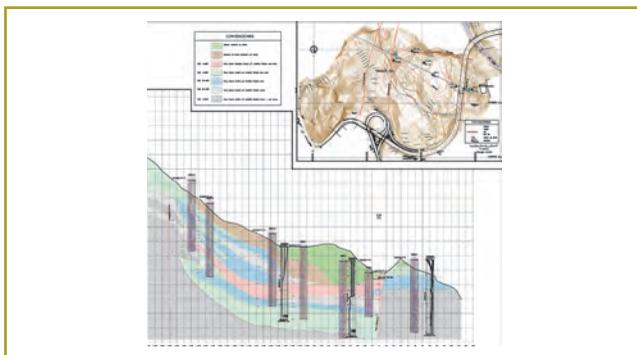


Figura 12. Sección geológico-geotécnica 440.

Se detectó claramente una franja de materiales de muy baja competencia mecánica, alta saturación y roca altamente alterada que coincidió con los niveles de mayor deformación reportados por los inclinómetros. Esta zona, más que una superficie, corresponde a un espesor de hasta 10 m, por el cual se ha dado el movimiento de la masa inestable.

#### Sección 540

Esta sección corresponde a un corte estratigráfico típico, que describe el movimiento del sector nororiental localizado hacia el puente sobre la quebrada El Cune. Se encuentra el relleno de lutita hasta profundidades de 8 m, suprayaciendo un depósito de coluvión con un espesor máximo de 10 m. Bajo los depósitos descritos se encuentran estratos de lutita de diferentes calidades, entre baja y alta. El movimiento que describe esta sección corresponde a un flujo de tierras cuya zona de falla se encuentra en el coluvión.

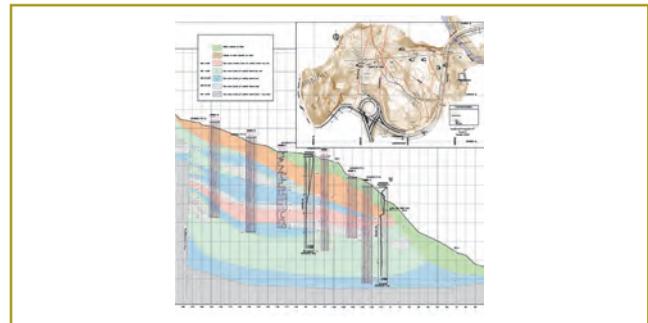


Figura 13. Sección geológico-geotécnica 540.

Una vez definidos los modelos geológico-geotécnicos para las secciones 440 y 540, se realizaron numerosos modelos numéricos de equilibrio límite para la condición actual, mediante su implementación en el *software* Slide V.5.0. Se supusieron inicialmente varios mecanismos de falla (circulares, bloque y formas aleatorias), variando los parámetros geomecánicos bajo la formulación Mohr-Coulomb (cohesión y ángulo de fricción).

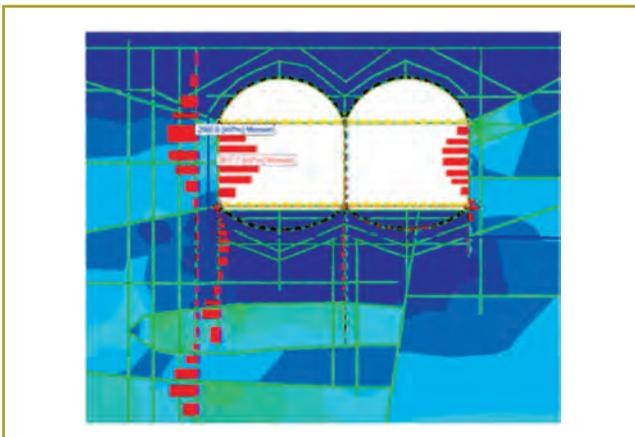
De igual manera, se representó el efecto del agua mediante tres métodos: asignación de una superficie piezométrica referida a los niveles encontrados mediante el monitoreo de piezómetros, que para efectos prácticos indica la presencia de agua muy cerca de la superficie actual del terreno; red de flujo con base en los valores de infiltración superficial definida, y representación de

una malla de presiones importada de los resultados del estudio de comportamiento hidrogeológico, en que se supone que la mayor cantidad de aporte de agua es subterránea.

Estas tres formas de concebir la respuesta hidráulica de la ladera dieron como resultado efectos muy similares en términos de representar el movimiento. Por lo anterior, a efectos de simplicidad numérica se decidió utilizar la formulación con líneas piezométricas con un peso unitario del agua ligeramente mayor ( $10,33 \text{ kN/m}^3$ ), con el fin de representar las presiones mayores de condiciones hidrostáticas medidas en campo.

Una vez modelada satisfactoriamente la condición de falla actual en las dos secciones de análisis, se procedió a modelar cada una de las etapas constructivas de la solución propuesta, que se describirán más adelante, utilizando los parámetros de comportamiento geomecánico definidos en el modelo de condición actual.

Por otro lado, para comprobar el mecanismo de falla supuesto en el análisis de equilibrio límite se implementaron estos modelos en el *software* de análisis por elementos finitos Phase 2.0. Desde el punto de vista estructural, de este modelo se obtuvieron las acciones (desplazamientos, axiales, cortantes, momentos) sobre los elementos que conforman la solución.



**Figura 14.** Salida del programa Phase 2. Se indican, por ejemplo, valores de momento en los elementos seleccionados.

Con base en los resultados de los ensayos de campo y laboratorio, ejercicios de retroanálisis, y valores de la bibliografía de referencia y estudios anteriores, se escogieron para el análisis numérico los siguientes parámetros geomecánicos que reproducirían en forma

adecuada el mecanismo de falla, acorde con lo mostrado por la instrumentación instalada.

Al estrato denominado “Lutita muy mala cizallada”, se le asignaron bajos valores, ya que se determinó que es este estrato el correspondiente a la superficie de falla.

**Tabla 2**

Parámetros de resistencia para modelo de equilibrio límite

Material	Peso unitario $\text{kN/m}^3$	Cohesión $\text{kN/m}^2$	Ángulo de fricción (°)
Relleno de lutita	23	40	28
Coluvión	19	10	18
Lutita muy mala cizallada	22	9	9
Lutita muy mala no cizallada	22	40	20
Lutita mala	22	50	30
Lutita media	22	150	35
Lutita buena	24	400	39

**Tabla 3**

Parámetros de resistencia para modelo de elementos finitos. Rango elástico

Material	Resistencia a la tensión $\text{kN/m}^2$	Ángulo de fricción pico (°)	Cohesión pico $\text{kN/m}^2$
Relleno de lutita	20	30	50
Coluvión	0	25	14
Lutita muy mala cizallada	0	9	9
Lutita muy mala no cizallada	0	25	50
Lutita mala	28	35	100
Lutita media	100	39	250
Lutita buena	100	39	400

**Tabla 4**

Parámetros de resistencia para modelo de elementos finitos. Rango plástico

Material	Ángulo de dilatación (°)	Ángulo de fricción residual (°)	Cohesión residual $\text{kN/m}^2$
Relleno de lutita	0	28	40
Coluvión	0	18	10
Lutita muy mala cizallada	0	9	9
Lutita muy mala no cizallada	0	20	40
Lutita mala	0	30	50
Lutita media	0	35	150
Lutita buena	0	39	400

**Tabla 5**  
Parámetros de módulo de Young y relación de Poisson

Material	Módulo de Young kPa	Relación de Poisson
Relleno de lutita	30.000	0,35
Coluvión	25.000	0,30
Lutita muy mala cizallada	15.000	0,30
Lutita muy mala no cizallada	50.000	0,30
Lutita mala	100.000	0,30
Lutita media	200.000	0,30
Lutita buena	400.000	0,40
Concreto	2.196.000	0,20

### Consideraciones estructurales

El diseño estructural se hizo con las siguientes premisas:

- Se requería un sistema resistente y dúctil, capaz de soportar eficientemente los esfuerzos y deformaciones transmitidos por el deslizamiento.
- Se necesitaba una estructura capaz de soportar grandes cargas verticales generadas por el relleno planteado, para estabilizar el mecanismo de falla del deslizamiento.
- Se requería un sistema constructivo que permitiera el trabajo por trincheras y tramos cortos, y que además fuera de rápida ejecución.

Para la solución estructural del falso túnel El Cune se analizaron diferentes opciones, buscando la de mayor viabilidad tanto técnica como económica y que se ajustara a las consideraciones de diseño básicas para una obra de alto grado de complejidad.

La solución final planteada es consecuencia de un refinamiento continuo, encaminado a optimizar los elementos estructurales y simplificar el sistema dentro de las exigencias mínimas de éste, guardando un esquema similar durante todo el proceso.

El diseño de los elementos estructurales se realizó según las fuerzas internas encontradas para las etapas de desarrollo del proyecto. Todos los elementos se caracterizaron según sus propiedades mecánicas y se tomaron parámetros críticos de influencia directa, que generaron las acciones más desfavorables a éstos. Se encontraron las acciones en cada uno a partir de envolventes de

esfuerzos generadas por el programa Phase2 (axiales, momentos y cortantes) y se calcularon para tener una resistencia mayor que los máximos encontrados.

### Obras de estabilización

Mediante el análisis de las formulaciones numéricas del deslizamiento, representado por la sección 440, se concluyó que debido al carácter masivo del movimiento no era suficiente darle un tratamiento de estabilización por medio de la construcción de estructuras de contención convencionales, ya que éstas requerirían soportar una fuerza de empuje del orden de 1000 t por metro lineal.

Por otro lado, considerando que el mecanismo de falla moviliza por simple efecto de gravedad una gran masa de roca alterada ladera abajo, que se confina contra el cerro del costado oriental, conformado por una unidad rocosa de muy buena competencia, la acción estabilizadora debería estar encaminada a actuar sobre esta gran masa, mediante la reconformación del perfil de la ladera en dos acciones complementarias y secuenciales:

1. Tendido o corte del talud.
2. Construcción de un relleno de contrapeso que, por medio de un efecto de balanza, permitiera llevar la masa movilizada a una condición de equilibrio por lo menos residual, mediante el incremento de las fuerzas resistentes.

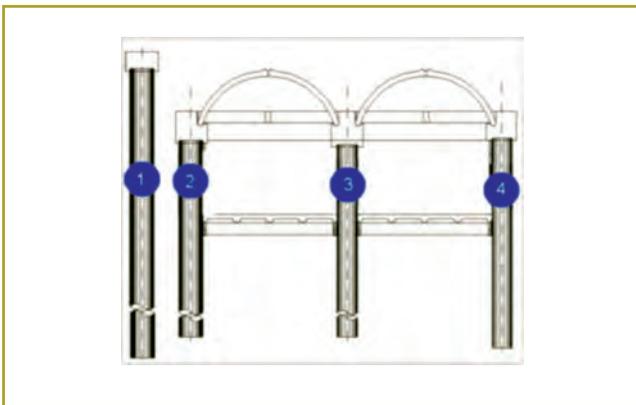
La solución final se describió como una primera fila de pilotes de 1,50 m de diámetro y 28 m de profundidad, separados a una distancia entre ejes de 2 m, vinculados entre sí mediante una viga cabezal (eje 1). Un aspecto muy importante de esta solución es la concepción de esta fila de pilotes independiente de la estructura del túnel denominada “pantalla switch”, que corresponde a pilotes de 1,50 m de diámetro y 25 m de longitud, que actuarían como una contención inicial al empuje de la masa de suelo, protegiendo la estructura del túnel incluso hasta colapsar.

Después de esta línea se encuentra la estructura principal del túnel, consistente en tres filas de pilotes así:

- Eje 2: 1,50 m de diámetro, 18 m de profundidad
- Eje 3: 1,25 m de diámetro, 18 m de profundidad
- Eje 4: 1,25 m de diámetro, 9 m de profundidad

Los pilotes se encontrarían separados 2 m longitudinalmente y se integrarían mediante viga cabezal. En la parte transversal los pilotes se apuntalarían mediante vigas prefabricadas, simplemente apoyadas en la sección rectangular y un sistema de bóvedas prefabricadas en arco y espesor de 35 cm, que se encargaría de transmitir las fuerzas horizontales y verticales generadas por el deslizamiento y el relleno, directamente a los pilotes.

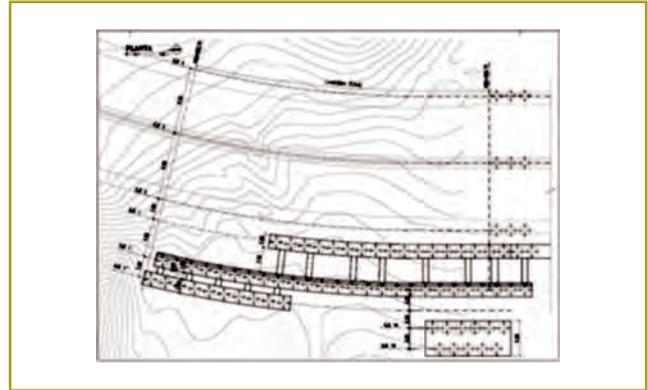
La parte inferior del túnel se había proyectado como un sistema de bóvedas que descansarían sobre vigas longitudinales para transferir las cargas generadas por la reacción del terreno en la solera (eliminada después del diseño), directamente a los pilotes. Para el sistema de piso se proyectó un sistema de vigas transversales de sección rectangular que apuntalarían transversalmente los pilotes. Dichas vigas, junto con la losa inferior, formarían un conjunto tipo T para transferir las cargas generadas por el tráfico a los pilotes.



**Figura 15.** Corte típico túnel falso, sección 440.

Para el tramo comprendido entre el km 80+872,6 y el 80+914,81 del abscisado vial (sección 540), se planteó la construcción de una estructura con un esquema estructural similar al planteado para el falso túnel, pero eliminando las bóvedas tanto superiores como inferiores y remplazándolas en la parte superior por una losa que reciba eventuales deslizamientos que pudiesen presentarse y que obstaculizarían el tráfico vehicular.

Esta solución, modificada también posteriormente, se remplazó con varias filas de pilotes amarradas con vigas cabezales y arriostradas entre sí (figura 16).



**Figura 16.** Distribución de pilotes en la sección no abovedada.

Para el tramo comprendido entre el km 81+054,81 y el 81+072,9, se planteó la construcción de un muro de contención cimentado transversalmente sobre un sistema de pilotes de 1 m de diámetro, encargados de transmitir los empujes al suelo de fundación y garantizar el empotramiento del muro. La altura del muro era de 7,75 m y se consideraron parámetros geotécnicos críticos para su diseño.

Por otra parte, teniendo en cuenta las conclusiones del estudio hidrogeológico, se debía construir un completo sistema de drenaje para el manejo de aguas superficiales y subterráneas, incluyendo aquellas con presiones artesianas. Se propusieron, entonces, dos alternativas para lo anterior:

Se planteó una primera alternativa que consistía en construir una galería drenante que se ocuparía de la mayoría del drenaje, complementada con *caissons* ubicados en algunos de los vértices de la geometría de la galería. Se propuso la construcción de 10 m de galería no drenada, que se encargaría del transporte de las aguas recolectadas; 170 m de galería drenada, encargada del drenaje y transporte de las aguas drenadas de los pozos artesianos, y finalmente 9 *caissons* de 20 m de longitud, encargados de drenar las aguas superficiales y llevarlas hasta la galería.

En una segunda alternativa se propuso un sistema en el que trece *caissons* de 20 m de longitud se encargaban de

la totalidad del drenaje, que finalmente conduciría a un tramo de 123 m de galería no drenada que transportaría las aguas hasta la quebrada El Cune.

El drenaje contaría con drenes horizontales y verticales. La construcción de estas medidas debía hacerse antes de la construcción del túnel falso.

La valoración numérica de la efectividad de cualquiera de las alternativas indica que el descenso esperado en la cabeza piezométrica es muy similar y se encuentra en el orden de los 25 m, en un periodo de aproximadamente cuatro meses después de su construcción.

Se recomendó, además, que las obras de estabilización descritas deberían llevarse a cabo de acuerdo con el siguiente orden:

- Etapa 1. Movimiento de tierras.
- Etapa 2. Construcción de elementos verticales. En la sección 440 debían construirse primero los pilotes de la “pantalla switch”.
- Etapa 3. Construcción de vigas longitudinales superiores
- Etapa 4. Excavación y montaje de vigas superiores.
- Etapa 5. Montaje de bóvedas superiores.
- Etapa 6. Relleno superior inicial hasta 4 m sobre la cota clave de bóvedas, con el fin de llegar a una condición de estabilidad inicial.
- Etapa 7. Excavación interior por secciones del túnel e implementación de vigas inferiores.
- Etapa 8. Construcción de vigas longitudinales inferiores
- Etapa 9. Excavación para construcción de bóvedas inferiores.
- Etapa 10. Construcción de bóvedas inferiores.
- Etapa 11. Montaje de prelosas y losas.
- Etapa 12. Relleno final.

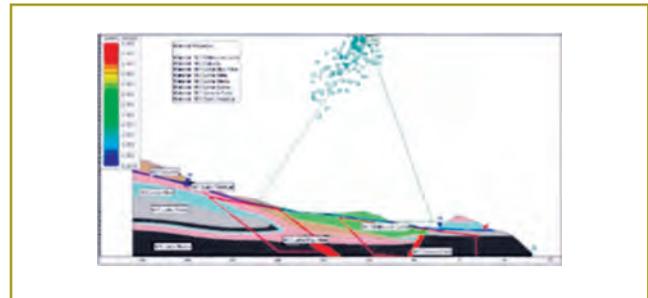
La inclusión del nuevo falso túnel en la masa de suelo involucró la realización de un nuevo diseño geométrico específicamente en este sector. Como consideración fundamental se buscó al máximo el aprovechamiento del viaducto existente que salva la quebrada El Cune. Para hacer tal cambio en el trazado se requiere la intervención del puente existente, ampliándolo un sobrancho de 3,5 m en el voladizo interior para la luz final del costado Villeta. En esta forma se garantizaría el alineamiento recto del proyectado falso túnel.

La importancia del monitoreo y seguimiento de las condiciones de la estabilidad de la ladera, cortes y de la

estructura misma, se controlaría con la instrumentación necesaria, para generar las alertas y tomar las medidas requeridas.

### Análisis de estabilidad

Como se comentó, para cada una de las etapas constructivas se llevó a cabo la modelación numérica con el fin de verificar que cada una tendría condiciones de estabilidad aceptables. Estos valores se obtuvieron mediante la modelación por el método de equilibrio límite.



**Figura 17.** Sección de análisis con el método de equilibrio límite. Sección 440.

A partir de las secciones geológico-geotécnicas, se obtuvieron los siguientes factores de seguridad para cada una de las etapas:

**Tabla 6**  
Factores de seguridad etapas constructivas

Etapa	Factor de seguridad	
	Sismo: No	Sismo: Aa=0,13 g
00 Condición actual	0,96	
01 Movimiento de tierras	1,29	
02 Elementos verticales	1,64	
03 Excavación + losa superior	1,54	
04 Bóvedas superiores	1,54	
05 Relleno bóvedas superiores	1,74	
06 Excavación frontal + losa inferior	2,04	
07 Excavación bóvedas inferiores	1,98	
08 Bóvedas inferiores	2,13	
09 Relleno final	2,14	1,14
10 Relleno final + abatimiento 5 m	2,31	
11 Final + abatimiento 10 m	2,46	
12 Final + abatimiento 15 m	2,59	1,35

Para todas las etapas constructivas se obtienen factores de seguridad entre 1,3 y 2,1, los cuales se encuentran dentro de los valores normalmente aceptados por las metodologías convencionales de diseño. Para la condición de conformación final el factor de seguridad obtenido es de 2,1 en condición estática y de 1,14 en condición dinámica ( $A_a=0,13 g$ ).

Los factores de seguridad anteriores son particularmente vulnerables a los niveles de abatimiento del agua, llegando a tener incrementos de hasta 35% de la condición sin abatimiento a la condición abatida.

La modelación numérica sirvió también para establecer órdenes de magnitud en valores de sollicitaciones a los elementos estructurales, pero principalmente desplazamientos horizontales en los pilotes, tal como se citan en la siguiente tabla:

**Tabla 7**  
Máximo desplazamiento horizontal en pilotes (cm)

Etapas	Ejes			
	1	2	3	4
Excavación + losa superior	10	3	3	2
Bóvedas superiores	14	5	4	3
Relleno bóvedas superiores	14	5	4	4
Excavación frontal + losa inferior	17	8	7	6
Excavación bóvedas inferiores	18	9	7	7
Construcción bóvedas inferiores	19	9	8	7
Relleno final	18	8	7	6

**Monitoreo**

Inicialmente se establece que con el fin de verificar los efectos de la etapa de movimiento de tierras se colocarían inclinómetros de precisión con los que se podrían monitorear topográficamente movimientos superficiales y, por supuesto, verificar el nivel y las características del movimiento. La ubicación de cada uno de los inclinómetros sería próxima a inclinómetros existentes para así comparar las lecturas.

También se colocarían extensómetros sobre el eje de la vía, a los cuales se les asignaría una coordenada relativa para realizar un seguimiento topográfico. Además, se monitorearía el movimiento vertical.

De acuerdo con los resultados de los monitoreos de las obras de estabilización preliminar, se programaría un plan de seguimiento a niveles de esfuerzos y defor-

maciones en los elementos estructurales, especialmente los pilotes de la fila interna.

Este monitoreo serviría en el proceso de construcción como herramienta para la retroalimentación con los modelos elaborados para cada sección.

**ETAPA CONSTRUCTIVA**

El diseño inicial, descrito con anterioridad, no se implantó exactamente. A lo largo de este capítulo se describirán los cambios a que hubo lugar.

Unas de las principales modificaciones fueron la prolongación de la “pantalla switch” y la eliminación de la estructura de túnel falso en la sección 540, remplazándose por varias filas de pilotes arriostrados en sus vigas cabezales.

**Construcción de elementos verticales**

En esta etapa se define la secuencia de pilotaje en la sección 440, en la que se propone un orden de perforación; de acuerdo con esto, se debe comenzar con los pilotes del eje 1 y secuencialmente se construyen los pilotes de los ejes 2, 3 y 4.

Debido a la complejidad del proyecto no se continuó con esta secuencia, ya que algunas zonas presentaron problemas al momento de la perforación (tabla 8). Los rendimientos para el pilotaje exigían que se perforaran al menos tres pilotes al día, por lo que se realizaron trabajos en distintas zonas sin un orden de construcción definido, priorizando las necesidades de la obra.

**Comportamiento del eje 1**

Como se mencionó, el eje 1 es la pantalla de contención diseñada para recibir los empujes y proteger los ejes 2, 3 y 4 durante el proceso constructivo del falso túnel.

Este eje se instrumentó casi en la mayor parte de los pilotes, con lo que se pudo establecer el comportamiento de éstos, tal como se muestra en la figura 18, en la que se grafica el desplazamiento total en cada inclinómetro, cuyo nombre corresponde al pilote en el que se embebió.

Así, la parte izquierda de la gráfica entre los pilotes 3 a 7 corresponde a la sección 540 (zona no abovedada) y

**Tabla 8**  
Problemas durante las labores de pilotaje

Problema	Dificultad	Solución
Presencia de muros en concreto reforzado.	Alta. Muy difícil de perforar	Excavar hasta la profundidad donde se encuentra el muro y después demolerlo.
Presencia de rocas de arenisca.	Alta. Difícil de perforar	Continuar con la perforación hasta romper la roca.
Lutita de calidad alta con mantos de calcita.	Alta. Difícil de perforar	Continuar con la perforación hasta romper el estrato de lutita de calidad alta.
Presencia de flujo de agua.	Media. Se presentan continuos deslizamientos dentro de la perforación	Aplicación de concreto pobre en la zona de fluencia de agua.

los pilotes 16 a 69 corresponden a la sección 440 (zona abovedada). En el pilote 14 se encuentra localizado el Portal Cune y hacia el pilote 69 se localiza el Portal Guaduas.



**Figura 18.** Inclinómetros eje 1.

Con el objetivo de facilitar la visualización del comportamiento del falso túnel después de finalizar la etapa de relleno final, las mediciones de los inclinómetros se normalizaron a partir del mes de julio de 2011.

En este gráfico se puede observar lo siguiente:

- Entre los pilotes 3 al 19 se reportaron movimientos asociados a los trabajos de excavación para la adecuación de la vía de acceso del Portal Cune.
- Los inclinómetros con desplazamientos inferiores a 200 mm representan el 17% de los instrumentos instalados y se encuentran ubicados en la zona de desplazamiento más baja en el proyecto reportado por la instrumentación.

- Los desplazamientos intermedios se encuentran en un rango de 200 a 500 mm. Estos inclinómetros representan el 70% del total de los inclinómetros instalados en el eje 1 durante la construcción de la sección 440. Nótese que estos desplazamientos se encuentran del pilote 5 al 38, en la sección 440 hacia el Portal Cune. El desplazamiento típico de los pilotes de esta “pantalla switch” fue entonces del orden de 30-40 cm.
- Los inclinómetros que reportaron más de 500 mm de desplazamiento fueron los de las zonas donde el relleno lutita no tenía los niveles de compactación descritos en el modelo, por lo que estos pilotes trabajaron en voladizo durante sus etapas constructivas, presentando en ellos desplazamientos superiores a los 1000 mm.

Los elementos verticales que reflejaron mayores deformaciones también estuvieron asociados con los primeros pilotes excavados dentro de la masa inestable, que fueron sometidos como unidades individuales a todo el empuje del movimiento. Una vez construidos más elementos y vinculados entre sí por medio de la viga cabezal, el comportamiento en grupo fue más eficiente.

**Tabla 9**  
Rango de desplazamientos en el eje 1

Rango de desplazamientos	Inclinómetros	
Superiores a 500 mm	3	13%
Intermedios entre 200 y 500 mm	16	70%
Menores de 200 mm	4	17%
<b>Total inclinómetros</b>	<b>23</b>	<b>100%</b>

Durante las etapas de construcción del falso túnel se presentaron diversos cambios plasmados en el gráfico de desplazamiento acumulado de la figura 20. El comportamiento de este desplazamiento va desde la etapa de fraguado del pilote hasta el relleno total, donde la tendencia es a estabilizarse.

Algunas situaciones particulares de importancia para el comportamiento de los inclinómetros, se han señalado en los gráficos 20 y 21 y se refieren a lo siguiente:

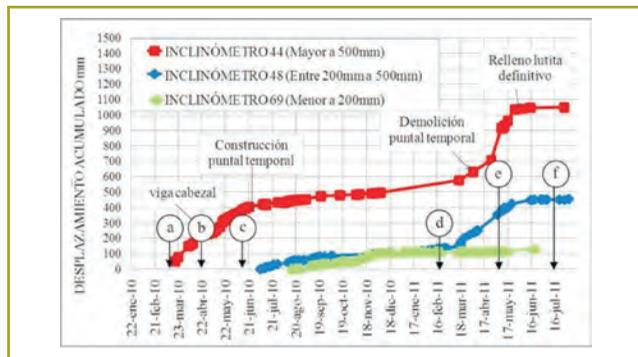


Figura 19. Desplazamientos máximos horizontales en el pilote 48 del eje 1.

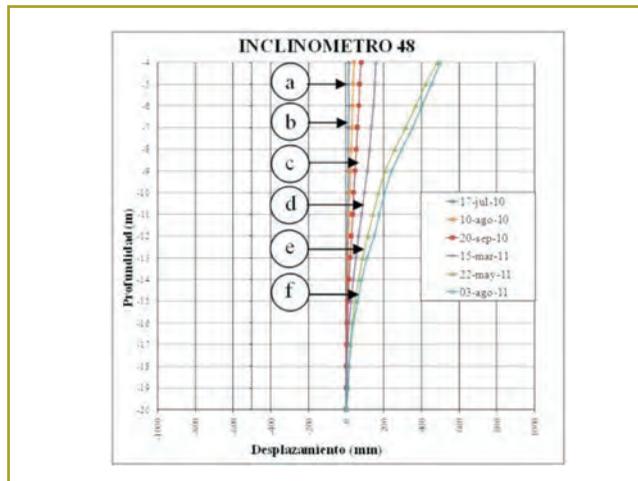


Figura 20. Desplazamientos máximos horizontales en el pilote 48 del eje 1.

- a) Fraguado del pilote donde se tienen velocidades de desplazamiento entre 1,0 mm/día y 5,0 mm/día. El pilote trabaja como un elemento individual, presentándose grandes desplazamientos debido a que no ha logrado la resistencia de diseño.
- b) La velocidad de desplazamiento también depende del número de pilotes construidos a su alrededor y de la

sección de movimiento más cercana. La tendencia de movimiento es casi lineal, definida con una pendiente de desplazamiento de 0,8 mm/día.

- c) Los pilotes se encuentran trabajando en grupo debido a la construcción de una viga cabezal, la cual está construida en tramos de cinco pilotes. Las velocidades de desplazamiento oscilan entre 0,1 mm/día y 0,3 mm/día.

Otra modificación hecha al diseño, y más exactamente al proceso constructivo, es la construcción de vigas temporales diagonales que se consideraron necesarias para contener los movimientos, ya que algunas zonas continuaron con una tendencia de desplazamiento a pesar de la construcción de la viga cabezal. Estos elementos transmitirían el empuje soportado por el eje 1, hacia los ejes 3 y 4 cercanos a la roca estable del costado oriental.

Mediante la instalación de deformímetros, pudo hacerse el seguimiento al comportamiento de estas vigas temporales. En la figura 21 se muestra como ejemplo el comportamiento de la viga puntal temporal 6.

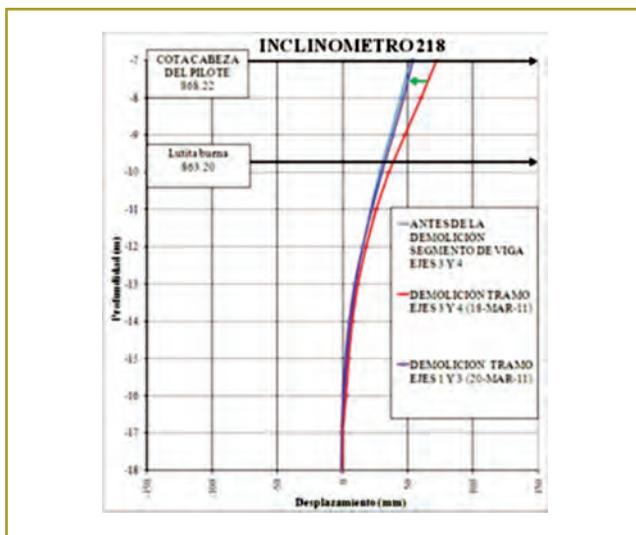


Figura 21. Comportamiento mostrado por los deformímetros instalados en la viga puntal temporal 6.

Una vez construida la viga temporal, ésta comienza a tomar carga hasta el momento en el que la excavación abierta vuelve a rellenarse, dados los requerimientos del proceso constructivo. Cuando se inicia la excavación para la instalación de puntales y bóvedas, el gradiente de deformación se incrementa en la viga hasta que se produce la falla (la pendiente en términos de deformación se aumenta porque al retirar el relleno la viga asume el trabajo del suelo para disipar los esfuerzos). Simultáneamente, las vigas puntales superiores anexas incrementan su carga axial.

- d) Demolición de la viga puntal temporal. La deformación unitaria se incrementa a medida que se debilita la sección hasta la ruptura de la viga.

Con base en las lecturas del inclinómetro 218 en el eje 3, antes y después de la falla de la viga puntal, fue posible identificar que antes de la demolición la deformación en el deformímetro 13 y el desplazamiento en el inclinómetro aumentan hasta un valor máximo (13,4 mm). Cuando la viga falla, el inclinómetro se devuelve a la lectura de referencia.



**Figura 22.** Desplazamiento mostrado en el inclinómetro 218, localizado en el eje 3.

- e) Continuación de los rellenos 4 m por encima de la cota clave de la bóveda. La tendencia del inclinómetro muestra que las velocidades de desplazamiento oscilan entre valores  $-0,1$  mm/día y  $0,1$  mm/día.
- f) Etapa final, en la cual el relleno de lutita alcanza los 8 m de altura. La tendencia de velocidades es del orden de  $0,001$  mm/día.

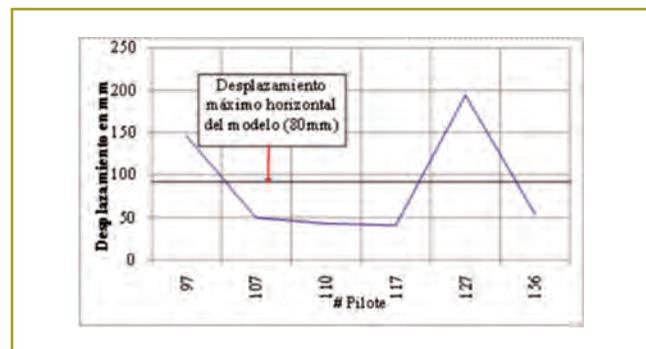
### Comportamiento del eje 2

En el eje 2 se instalaron seis inclinómetros, distribuidos a lo largo del trazado del túnel falso. Los resultados obtenidos de la instrumentación presentan dos zonas de movimiento que superan la línea de desplazamiento máximo de 80 mm, definido por el modelo (figura 25).

El comportamiento del eje 127 (mayor desplazamiento que en los demás inclinómetros) se asoció al hecho de que este pilote se construyó primero que su protección en el eje 1 (pilote 48). Este pilote presentó una acumulación de desplazamiento del orden de 80 mm antes de ser construido el pilote 48 del eje 1. Adicionalmente, estos elementos se encuentran en el vector de desplazamiento donde se han reportado los mayores desplazamientos.

Otro valor pico en la figura 25 corresponde al pilote 97. Esto se asocia a las demoras que se presentaron al momento de la construcción de la viga puntal temporal 2 (VP2). Durante este proceso el pilote reportó un desplazamiento horizontal de 70 mm, y una vez construida la viga temporal el instrumento mostró estabilización.

Después de demoler la viga temporal no se reportaron cambios de desplazamiento importantes, como en el eje 1; esto se debe a que entre los ejes 2 y 3 del túnel los empujes son distribuidos a través de las puntales superiores.



**Figura 23.** Comportamiento de los inclinómetros del eje 2.

### Comportamiento del eje 3

El eje 3 corresponde al eje intermedio en la estructura del túnel falso. En él se instalaron cuatro inclinómetros que muestran desplazamientos dentro del estimado en el modelo. Esto se asocia a que el empujamiento de dichos elementos está en la formación de lutita de buena calidad, localizada al oriente del trazado del túnel.

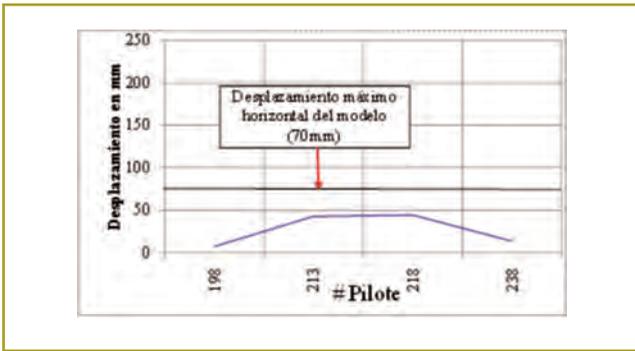


Figura 24. Inclinómetros eje 3.

### Comportamiento del eje 4

Este eje corresponde a la fila de pilotes localizados en el extremo oriental de la sección, empotrados en la formación de roca de buena calidad. En estos pilotes se instalaron nueve inclinómetros que muestran un comportamiento estable, con valores inferiores al estimado en el modelo. Se observa un escalón asociado a procesos de excavación y demolición de vigas puntales temporales localizadas entre los pilotes 319 y 329.

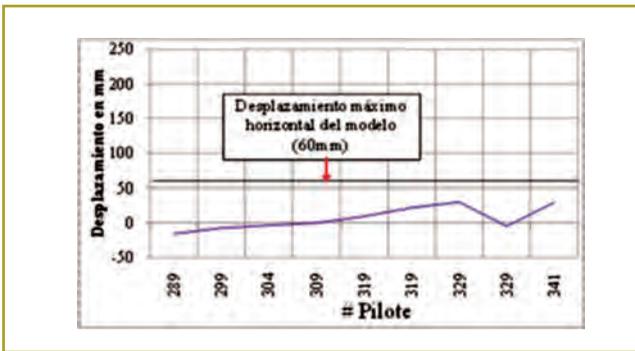


Figura 25. Inclinómetros eje 4.

### Inclinómetro en formación rocosa estable de la parte oriental del sitio

Antes de la construcción del falso túnel se instalaron tres inclinómetros en la formación rocosa estable localizada al oriente de éste, con el fin de determinar su estabilidad. Los resultados de las mediciones indican que la zona presenta desplazamientos máximos que oscilan en un rango de  $-8,0$  mm a  $0,4$  mm, tomados a 3 m de profundidad. Durante las etapas constructivas del falso túnel no se reportaron cambios en los desplazamientos de los inclinómetros.

Como se comentó en el apartado de diseño, la estabilidad de esta formación es determinante para el éxito de la solución planteada.

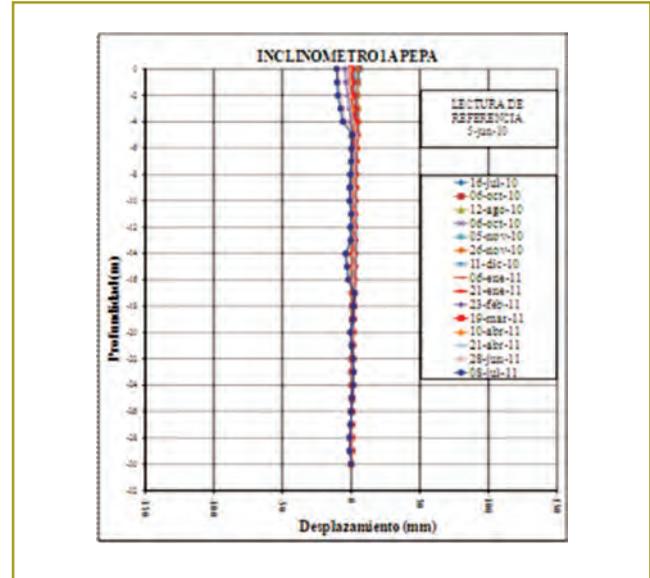


Figura 26. Inclinómetro del cerro estable oriental.

### Pluviómetro

Con el propósito de medir los efectos de las precipitaciones en el proyecto, se instaló un pluviómetro convencional de 100 mm, para hacer lecturas a diario. En la figura 27 se observa el comportamiento de la precipitación desde el mes de marzo de 2010. Se pueden identificar dos periodos invernales del año 2010 con precipitaciones máximas en abril y noviembre. Se observa también que el valor de la precipitación mensual acumulada ha sido en general mayor que la medida en 2010, en especial en el mes de abril.

La influencia de la precipitación es notable en el comportamiento de los movimientos superficiales especialmente. En la figura 28 se observa el marcado aumento de estos valores de velocidad de movimiento superficial, medido por una comisión topográfica, y que concuerda con los periodos invernales mencionados.

En el periodo invernal de noviembre de 2010 se alcanzaron velocidades de  $4,5$  cm/día. En este lapso se drenaron constantemente los *caissons* y la galería drenante se encontraba funcionando normalmente; por tal motivo, las velocidades en mojoneros no fueron máximas.

En el siguiente periodo invernal, se presentaron velocidades de 7 cm/día. En este periodo no se efectuaron las labores de drenaje adecuadas, ya que las conexiones de los *caissons* drenantes hacia la galería se encontraban interrumpidas, luego de los deslizamientos que se presentaron en el mes de noviembre de 2010.

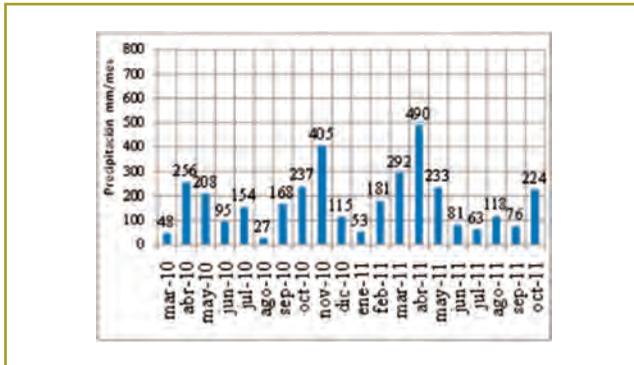


Figura 27. Precipitación mensual acumulada.

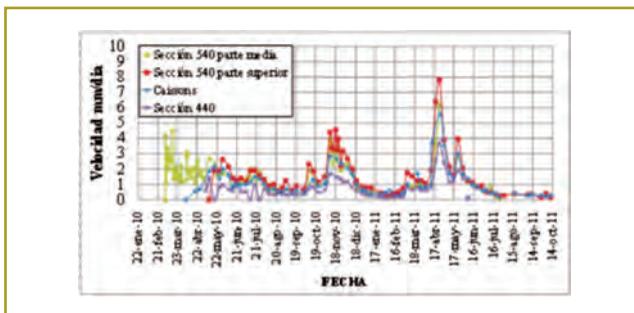


Figura 28. Velocidad de movimiento superficial.

### Piezómetros

Como principal herramienta para determinar las presiones de poros se han utilizado tres piezómetros de hilo vibrátil localizados de acuerdo con la figura 29. Así, el piezómetro 1 muestra el comportamiento del nivel freático en cercanías del túnel falso y el piezómetro 3 será el más sensible respecto a las actividades que se hagan en los *caissons* drenantes.

El comportamiento del nivel freático medido se muestra en la figura 30, donde se puede observar la influencia de actividades como conexiones a la galería de drenaje, terraceo y excavaciones con manejo de aguas:

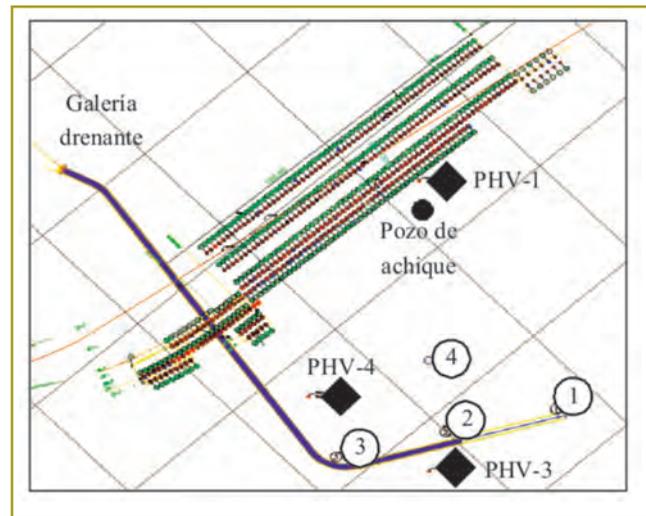


Figura 29. Localización de piezómetros.

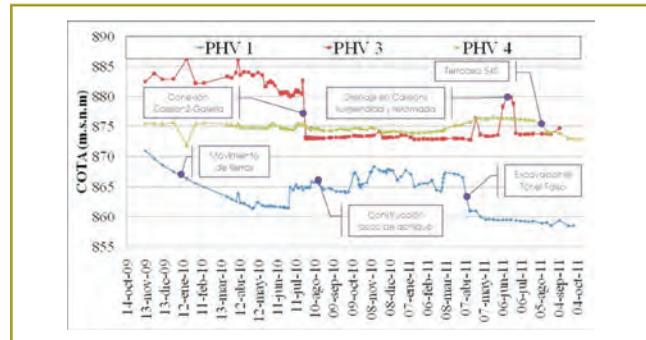


Figura 30. Niveles piezométricos.

El PHV-1 presenta tres estados: el primero es una reducción en su nivel desde el 13 de noviembre de 2009, debido a los efectos de los movimientos de tierra iniciales en el proyecto. Después (11-jul-11 a 7-abr-11) se presenta un incremento del nivel freático asociado a las labores de pilotaje. En esta zona se encontró presencia de agua que dificultó las labores hasta que se construyó un pozo de achique. El último estado se presenta en el mes de mayo de 2011, cuando se inician actividades de excavación en el interior del túnel: el nivel de aguas se abatió hasta la cota de la rasante de la vía.

El PHV-3 se encuentra ubicado muy cerca del *caisson* 2, y sus cambios en el nivel piezométrico obedecen al drenaje y no drenaje de dicho elemento. Cuando se conectó el *caisson* 2 a la galería, el nivel piezométrico se abatió 15 m. Posteriormente hay unos picos que se presentan cuando el *caisson* no fue drenado.

El PHV-4 se encuentra localizado hacia la parte media de la sección 540. En los últimos meses, el nivel

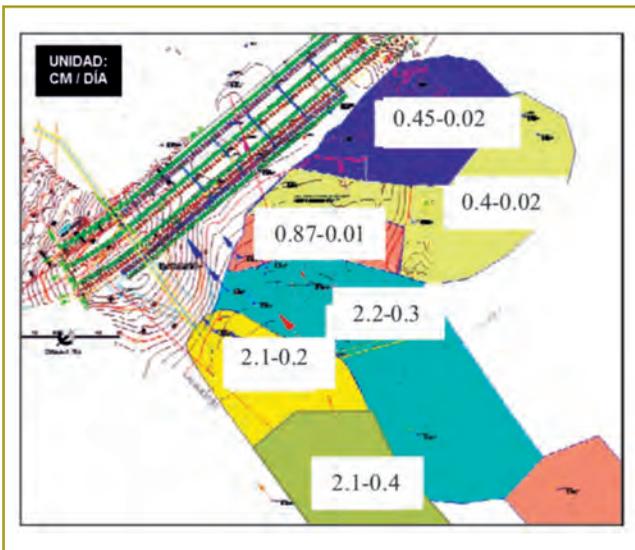
piezométrico bajo debido a los efectos del terraceo que se adelantó en la sección.

**Mojones de control**

En total, se instalaron 28 mojones de control, de los cuales nueve se encuentran localizados en la parte superior de la sección 540, seis en la parte media, nueve en la sección 440 y cuatro en los *caissons*. La distribución de estos elementos ha permitido identificar zonas de comportamiento homogéneo, distribuidas tal como se muestra en la figura 33. En ésta se muestran los valores de velocidad diaria, medida al inicio del proyecto (primer valor) y en la actualidad (segundo valor). Se puede observar, entonces, disminución en el movimiento superficial en todas las zonas. Adicionalmente, se puede apreciar que en las zonas media y alta de la sección 540, los valores de desplazamiento son mayores que los medidos en la sección 440.

**Tabla 10**  
Disminución de velocidades en porcentaje

Sección	Velocidad inicial (cm/día)	Velocidad Final (cm/día)	Porcentaje de reducción
Sección 540 parte superior	2,10	0,4	80,95
Sección 540 parte media	2,10	0,2	90,48
Sección 440	0,87	0,3	65,52
Caisson	2,20	0,01	99,55



**Figura 31.** Zonas de movimiento superficial homogéneo.

**Deformímetros**

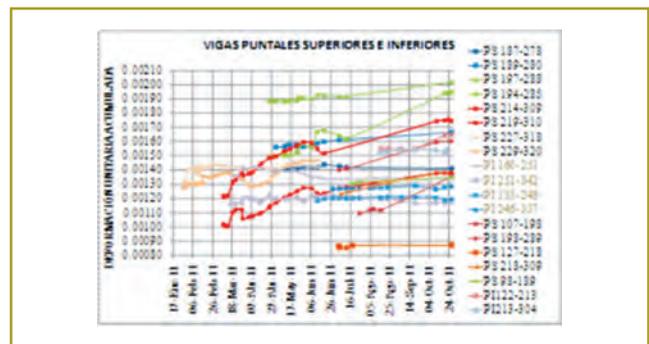
Tales elementos muestran la deformación unitaria presentada en el elemento. Fueron instalados en los pilotes del eje 1 (P5, P44, 14 y P38), eje 2 (P107, P110, P117, P122 y P127) y eje 4 (P304). También se instalaron deformímetros en las vigas temporales dos (VP2), tres (VP3), cuatro (VP4), cinco (VP5), seis (VP6) y vigas puntales definitivas superiores e inferiores.

En la figura 32 se presenta el comportamiento de los deformímetros instalados en la mitad de la luz de las vigas puntales superiores e inferiores.

En las curvas se observa la sensibilidad a procesos como la demolición de las vigas puntales temporales, generando un aumento en la deformación unitaria acumulada, así como la influencia del relleno de lutita sobre las bóvedas, actividad que disminuye la deformación unitaria.

En la actualidad el seguimiento que se hace para los deformímetros se ha centrado en los instalados en las vigas puntales superiores e inferiores, buscando identificar el comportamiento de la estructura ante las excavaciones en el interior del túnel y el relleno en tierra armada sobre las bóvedas.

Seguidamente se muestra el resumen de las lecturas hechas (figura 32). En general, se observó que la deformación unitaria aumentó en las puntales anexas a viga diagonal, cuando fue demolida y disminuyó con ocasión del relleno sobre las bóvedas.



**Figura 32.** Deformación unitaria en vigas puntales superiores e inferiores.

Al momento de la elaboración del presente artículo, son objeto de estudio y seguimiento riguroso las vigas puntales superiores apoyadas en los pilotes 198 a 289, 218 a 309 y sus estructuras anexas, debido a que las últimas lecturas mostraban un aumento considerable

en la deformación unitaria acumulada. Sin embargo, las lecturas del último mes han mostrado una tendencia asintótica que refleja el equilibrio de la estructura.



**Figura 33.** Fotografía aérea de la construcción del túnel falso El Cune (mayo de 2011).

## CONCLUSIONES

- Durante el desarrollo de este proyecto se evidenció la enorme relevancia que tiene un robusto programa de instrumentación en la gestión de un deslizamiento complejo en sus fases de diseño, construcción y seguimiento en operación. En materia de diseño fue posible identificar y delimitar espacialmente con certeza la superficie de falla. Aunque en los estudios anteriores se habían esbozado mecanismos de rotura, sólo hasta este último, basado en la información de inclinómetros, se verifican las profundidades, velocidades, direcciones y magnitudes del evento. Adicionalmente, con base en el seguimiento de los piezómetros se encontró la presencia de niveles artesianos que tienen una incidencia determinante en la estabilidad de la masa del suelo. Esta nueva información permitió tener una concepción más clara y objetiva acerca del fenómeno y el planteamiento de soluciones ingenieriles. Posteriormente, durante la etapa de construcción, la instrumentación ha representado la herramienta por excelencia para la toma de decisiones, en espe-

cial frente a situaciones que se presentan en obra y que no pudieron preverse en la etapa de diseño. Igualmente, los modelos conceptuales y numéricos de las obras correctivas se retroalimentaron con la información proveniente del monitoreo de desplazamientos, deformaciones y presiones de poros, lo cual ha permitido tener un modelo estructural activo y dinámico que se ha ido modificando con el avance de la obra.

Actualmente, en la etapa final de construcción se continúa con el seguimiento de los instrumentos y se está preparando la fase de instrumentación.

- Los aportes de la instrumentación en el desarrollo de las diferentes etapas del proyecto se listan a continuación:
  - Seguimiento de una proporción importante de los pilotes en cada etapa constructiva, para determinar las modificaciones o aciertos dentro del diseño.
  - Identificación de la necesidad de construcción de puntales temporales para contener los empujes durante la construcción de vigas cabezales e instalación de bóvedas y puntales.
  - Valoración de los efectos de la demolición de las vigas puntales temporales en los tramos del túnel.
  - Determinación de los periodos invernales, sus efectos en los movimientos superficiales, profundos y en las acciones sobre la estructura.
  - Medición de las deformaciones unitarias en elementos instalados, con el fin de determinar si continúan deformándose durante todas las etapas.
  - Medición de los desplazamientos superficiales con el fin de determinar las trayectorias, magnitudes y velocidades.
  - Medición de niveles piezométricos, presiones de poros y su relación con las precipitaciones.
- El modelamiento numérico de un evento y de sus posteriores fases constructivas en un deslizamiento de esta magnitud y complejidad demanda utilizar, además de las metodologías clásicas de equilibrio límite, técnicas de interacción suelo-estructura, tales como los elementos finitos.

Considerando que la solución final de estabilización implicó en este caso una serie de etapas de construcción de elementos verticales, obras de drenaje, movimientos de tierras y elementos estructurales del

túnel falso, se limitó el alcance de los resultados obtenidos en equilibrio límite en términos de factores de seguridad para cada etapa, con el propósito de estimar las acciones sobre cada uno de los elementos a lo largo del tiempo que determinaban su diseño estructural, así como la macroconcepción desde el punto de vista geotécnico.

Lo anterior se superó por parte del consultor utilizando modelaciones en el *software* Phase 2.0 en condiciones estáticas y pseudoestáticas. Para corroborar los resultados se contrató un consultor internacional independiente, Jolsa S.A., que hizo modelos de contraste utilizando el *software* Plaxis. Los efectos sísmicos se valoraron adicionalmente mediante la modelación con el módulo dinámico de Plaxis, a cargo de la firma Jeoprobe Ltda.

Las acciones sobre los elementos estructurales fueron a su vez verificadas por los especialistas de Pedelta S.A. con ayuda del *software* Robot. La comparación de todos estos resultados permitió definir envolventes de acciones, con las cuales finalmente se dimensionaron los elementos estructurales.

- Tal como ocurre físicamente entre las estructuras y los materiales térreos, es determinante que todas las especialidades interactúen en forma dinámica y complementaria en la gestión de soluciones a deslizamientos.

Una fuerte interacción suelo-estructura (geotecnistas + estructurales), y en este caso especialistas hidráulicos, generó una sinergia de conocimientos, ideas y concepción de soluciones que permitieron retroalimentar secuencial y continuamente la concepción y el diseño de las obras finales de estabilización.

- La implementación de un sistema de pantallas de protección, como el eje 1 en manejo de este tipo de deslizamientos masivos, resultó ser un acertado mecanismo que permitió la construcción de la obra definitiva.
- La valoración de acciones sobre las obras correctivas en deslizamientos de magnitud y complejidad importante exige el modelamiento espacial en forma tridimensional.

Una vez realizado el monitoreo de la instrumentación se evidenció que el mecanismo masivo de este deslizamiento tiene características espaciales de dirección, profundidad, velocidad y tipo de movimien-

to que no pueden describirse adecuadamente con modelos 2D, los cuales no tienen en cuenta efectos propios de la naturaleza tridimensional del evento. Es importante evaluar esta situación y desarrollar metodologías o herramientas de cálculo numérico que permitan considerar tales efectos.

- De acuerdo con los resultados de las actividades de monitoreo a las obras correctivas que conforman el túnel falso en el sitio inestable El Cune, es posible afirmar que éstas presentan un comportamiento adecuado que brinda una solución definitiva para habilitar el paso de vehículos en dicho sector, el cual ha estado cerrado por más de quince años.
- Las actividades de excavación en rocas de tipo lodoso, como el caso de las lutitas, demandan una rápida intervención y protección, ya que se evidenció durante la ejecución de las obras que estos materiales presentan una degradación muy acelerada por exposición al aire o al agua, por lo que pasan de poseer características geomecánicas de rocas blandas a materiales tipo suelo.
- En general, las velocidades más fuertes del desplazamiento en el eje 1 se presentaron durante la etapa de excavación para la construcción de vigas cabezales e instalación de puntales y bóvedas, con tasas de desplazamiento mayores de 1 mm/día. Durante la construcción de un falso túnel es necesario atacar estas actividades por lo menos con frentes de trabajo de 24 h y así mitigar los efectos de tales procesos en los pilotes.
- La función de los *caissons* y la galería de drenaje en el abatimiento del nivel freático es determinante para las condiciones de estabilidad. Por esta razón, los trabajos que se realizan actualmente están encaminados a la puesta en marcha de dicho sistema.
- La correlación entre los registros pluviométricos y la ocurrencia de eventos determinó que en este sitio, a partir de tres a cinco días de lluvia precedente con un acumulado mayor de 150 mm, se empiezan a presentar deslizamientos locales.
- Actualmente se encuentran en etapa de diseño varios proyectos viales de orden nacional que se desarrollarán a lo largo de formaciones de rocas lodosas similares a las encontradas en el sitio inestable El Cune. Es muy importante considerar el precedente de este sitio cuando se aborden cortes de alturas considerables en materiales de esta naturaleza.

- El análisis posterior de toda la información recopilada en esta obra permitirá avanzar en el conocimiento del comportamiento de las rocas lodosas en deslizamientos, así como en la interacción de estructuras con este tipo de materiales.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean manifestar sus agradecimientos a la Concesión Sabana de Occidente (CSO) y a las firmas consultoras y constructoras que ha hecho posible llevar a buen término los estudios y obras del sitio inestable El Cune, especialmente a Pedelta S.A.

Así mismo, a los ingenieros Alba Lucía Naranjo Corredor y Daniel Oswaldo Tique Alviar, del equipo técnico de GYC, por sus valiosos aportes en la elaboración de este documento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aquaterra, Ingenieros Consultores (2001). Estudio y diseño de las obras para el control del deslizamiento ubicado en el PR 64+700 en el sector conocido como El Cune, en inmediaciones del casco urbano de Villeta (Cund.). Informe final. Abril.
- APC Ltda. Ingenieros Consultores (2005). Estudios para la estabilización del deslizamiento El Cune (P.R. 64+0300 a P.R. 64+0700), carretera Honda - Villeta - Tobiagrande - Bogotá (5008). Informe final.
- Castro, C. (2004). Tesis de grado para optar al título de Especialista en Geotecnia con Énfasis en Vías. Seguimiento de la inestabilidad en el sector El Cune (PR 64+000 y el PR 65+850), vía Honda - Bogotá, y evaluación de soluciones implantadas entre los años 1994 y 2002. Febrero de 2005.
- Consortio Túnel Falso Cune (2009-2011). Informes mensuales Interventoría técnica construcción de túnel falso Cune.
- Consortio Túnel Falso Cune (2009-2011). Reportes mensuales. Reportes de Instrumentación.
- Consortio Túnel Falso Cune (2009-2011). Reportes diarios. Bitácora diaria.
- Consortio Túnel Falso Cune (2009). Informe geotécnico sitio inestable El Cune.
- Consortio Villeta (2007). Estudios geotécnicos para la construcción de la variante de Villeta, estabilización del paso nacional por Villeta, planta de Ecopetrol y otros sitios críticos o declarados en situación de emergencia por fenómenos de remoción en masa. Sitio 1. Deslizamiento de El Cune. Noviembre de 2007.
- González, G. & Montero-Olarte, J. (2007). El Cune slide in mudstones and shales in Colombia: history and analyses. 11th Congress of The International Society for Rock Mechanics. Lisboa, Portugal. Informe geotécnico sitio inestable El Cune. Versión 1,0. Página 11 de 64.
- Hidrogeocol (2008). Elaboración de un modelo numérico hidrogeológico en el sitio de inestabilidad El Cune. Autopista Bogotá - Villeta.
- Jeoprobe (2009). Estudio de análisis dinámico para el sitio inestable El Cune.
- Jolsa (2009-2011). Informes de asesoría sitio Inestable El Cune.
- Palomino, C. (2011). Estudio del terreno y obras correctivas en el sitio El Cune, municipio de Villeta (Cundinamarca), con aplicación del método observacional. Tesis de maestría.
- Ulloa & Diez (2008). Informe de la exploración geofísica realizada para el deslizamiento ubicado en el sector de El Cune en Villeta (Cundinamarca).
- Montero, J., González, A., Castro, H. & Osorio, J. (2004). Seguimiento de la inestabilidad en el sitio El Cune. X Congreso - V Seminario Colombianos de Geotecnia. Agosto.
- Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (2005). Propuesta de solución para el paso permanente en el sitio El Cune de la carretera Honda-Villeta-Tobiagrande-Bogotá. Ruta 50, tramo 5008. Febrero.
- Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (2003). Estudio de diagnóstico de la emergencia entre el PR 64+000 y el PR 65+850 El Cune, de la carretera Honda - Villeta - Tobiagrande - Bogotá. Ruta 50, tramo 5008. Octubre.
- Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá (2002). Estudio de diagnóstico de la emergencia entre el PR 64+000 y el PR 65+850 de la carretera Honda-Villeta-Tobiagrande-Bogotá. Ruta 50, tramo 5008. Agosto.

# **Cloud storage aplicado en la gestión de la calidad y manejo de documentos en laboratorios científicos**

## **Cloud Storage applied in quality management and document management in scientific laboratories**

**JAVIER ENRIQUE DE LA HOZ FREYLE<sup>1</sup>, HERMAN RAMÍREZ GÓMEZ<sup>2</sup>, LUIS CARLOS GÓMEZ FLÓREZ<sup>3</sup>**

1. Estudiante de la maestría en Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Industrial de Santander.
2. Estudiante de la maestría en Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Industrial de Santander.
3. Magíster en Sistemas, profesor titular y director de Investigación y Extensión de la Facultad de Fisicomecánicas de la Universidad Industrial de Santander.

Recibido: 25/06/2012 Aceptado: 17/07/2012

Disponibile en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### **Resumen**

La gestión documental dentro de las organizaciones al incorporar sistemas de gestión de calidad (SGC) conlleva importantes retos debido a las grandes cantidades de información manejadas, así como a la demanda en su confiabilidad, disponibilidad, integridad y confidencialidad. Los laboratorios científicos de análisis de muestras regidos por la norma ISO 17025 no son la excepción, y requieren grandes esfuerzos para manejar los documentos generados por los SGC. *Cloud storage* surge como una alternativa para cubrir las necesidades de la gestión documental. Sin embargo, en el caso de los laboratorios se hace necesario relacionar los documentos y la información generada por los servicios de ensayo, de manera que la gestión de un documento resulte una tarea sencilla.

En este artículo se describe el proyecto de desarrollo del módulo de gestión de archivos de HSLAB, mediante el cual la Universidad Industrial de Santander ofrece soporte a la gestión de información de sus laboratorios.

**Palabras claves:** *cloud storage*, gestión de calidad, gestión de documentos, ISO 17025, laboratorios científicos.

### **Abstract**

Document management within organizations by incorporating Quality Management Systems (QMS), entails important challenges because to the large amount of information handled, as well as the demand of its reliability, availability, integrity and privacy. Scientific laboratories analyzing samples governed under ISO 17025 are no the exception, and they require great efforts to manage the documents generated by the QMS. *Cloud Storage* arises as an alternative way to meet the document management needs. However, in the laboratories case is necessary to link the documents and the information generated by the sample testing services, so that the document management results an easy task. This paper describes the development project of the Files Management Module of HSLAB, through it; the Universidad Industrial de Santander offers support to the information management of its laboratories.

**Keywords:** *Cloud Storage*, Quality Management, Document Management, ISO 17025, Scientific Laboratories.

## INTRODUCCIÓN

La certificación de una organización por un estándar de calidad supone una serie de ventajas competitivas en el mercado, haciendo atractivo el consumo de productos y servicios ofrecidos, aportando credibilidad y confiabilidad a la firma. Para los laboratorios de análisis de muestras, la certificación de calidad otorgada por el cumplimiento de la norma ISO 17025 supone un crecimiento en la demanda de sus servicios de ensayo y, por ende, un posicionamiento en el mercado.

Sin embargo, existen ciertas dificultades y barreras que las organizaciones deben sortear para lograr una satisfactoria implementación de un sistema de gestión de calidad. Como menciona Masters (1), existen nueve barreras en la aplicación de sistemas de gestión de calidad: inhabilidad en el cambio de la cultura organizacional; falta de entrenamiento y educación permanente; falta de compromiso en el sector administrativo; inapropiada planeación para la implementación; técnicas de medición poco exitosas; individuos y departamentos aislados y estructura organizacional incompatible; insuficiente atención prestada a los clientes; insuficiente aplicación del trabajo en equipo y empoderamiento; y falta de acceso a datos y resultados. Es esta última dificultad la que hace referencia, en ocasiones, a la deficiente gestión documental y de información que desarrollan las compañías con el fin de obtener ventajas por medio de las certificaciones de estándares de calidad, lo que dificulta el proceso mismo de certificación.

La Universidad Industrial de Santander (UIS), por intermedio de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE), ha implementado el programa de acreditación de laboratorios, con el propósito de lograr la acreditación de los laboratorios de análisis de muestras según la norma ISO 17025. A través de este programa surgió la oportunidad de adaptar la herramienta *software* Labcrom<sup>1</sup>(2) para brindar soporte a las labores de gestión de información y documentos de los laboratorios inscritos en dicho programa, lo que dio origen al *software* HSLab<sup>2</sup>.

El módulo de Gestión de Archivos de HSLab, acá descrito, se diseñó y codificó específicamente para dar soporte a la gestión de archivos y documentos de los laboratorios, orientado por el paradigma *cloud computing*, basado en las características de los servicios *cloud storage*, que permiten un fácil acceso desde cualquier lugar y momento, desde cualquier dispositivo con navegador de internet a los documentos, asegurando la confiabilidad, confidencialidad e integridad de la información.

En este artículo se presenta el desarrollo del módulo de Gestión de Documentos de HSLab, dividido de la siguiente manera. En el segundo capítulo se definen los conceptos de *cloud computing* y *cloud storage*, en el capítulo siguiente se habla acerca de la situación observada en los laboratorios de análisis de muestras inscritos en el programa de acreditación de laboratorios de la VIE, en el cuarto se menciona la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, seguido de los resultados, y finalmente se dan las conclusiones y agradecimientos.

## CLOUD COMPUTING

*Cloud computing* (CC), que en español traduce “computación en la nube”, toma el nombre del símbolo dado a internet en los diagramas de redes (nube), debido a que lo propuesto en CC es ofrecer recursos de tecnologías de información (TI) a través de la infraestructura de internet. Actualmente existen varias definiciones de CC que difieren dependiendo del autor, pero el NIST<sup>3</sup> ofrece una definición que para la mayoría de los profesionales en TI es acertada: “... es un modelo que permite un cómodo acceso a un conjunto configurable de recursos computacionales compartidos sobre demanda a través de internet (redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios) que pueden ser rápidamente provistos y entregados con mínimo esfuerzo de gestión o interacción con el proveedor de servicios”. Otra de las definiciones que complementan la anterior es la planteada por Gartner (3), que describe el CC como “un estilo de computación donde las capacidades TI, escalables y elásticas, son provistas como un servicio a clientes usando tecnologías de internet”.

1. Herramienta *software* para la gestión de información del proceso de servicio de ensayo del Laboratorio de Cromatografía de la UIS.
2. Herramienta *software* de gestión de información de laboratorios.

3. National Institute of Standards and Technology

**Tabla 1**  
Ventajas y desventajas de *cloud computing*. Tomada y adaptada de Marks & Lozano (4)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• No requiere gran poder de cómputo en las máquinas de los usuarios.</li> <li>• Bajo costo de infraestructura en proyectos de TI.</li> <li>• Bajo costo de mantenimiento <i>software</i>.</li> <li>• Actualizaciones <i>software</i> al instante.</li> <li>• Gran capacidad de almacenamiento.</li> <li>• Aumento en la colaboración de proyectos y documentos.</li> <li>• Compatibilidad entre sistemas operativos.</li> <li>• Universalidad de acceso a documentos e información.</li> <li>• Compatibilidad entre dispositivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere conexión a internet constante.</li> <li>• No funciona bien con conexiones lentas a internet.</li> <li>• Las características pueden ser limitadas en comparación con productos de escritorio.</li> <li>• Los datos almacenados pueden estar más expuestos a sufrir ataques de <i>hackers</i>.</li> </ul>

Al ofrecer la oportunidad de consumir recursos tanto *hardware* como *software* a través de internet, sin importar el momento ni el lugar donde se encuentre el usuario, CC provee de una serie de ventajas que los usuarios pueden aprovechar, así como los desarrolladores de soluciones de TI. Sin embargo, CC también posee algunas características que se convierten en desventajas o incomodidades al momento de consumir y ofrecer servicios de TI (tabla 1).

Compañías como Google, Amazon, Sales Force, Yahoo, Microsoft, han invertido grandes sumas de dinero, tiempo y esfuerzo para poder ofrecer servicios orientados en el modelo de *cloud computing* con el objetivo de brindar mejores prestaciones y más facilidades para los usuarios finales. El impulso que estas empresas han dado sobre CC ha hecho que muchos usuarios y otras compañías consuman y ofrezcan recursos y servicios a través de internet, no sólo como una moda computacional, sino por las ventajas que tiene. De hecho, un

estudio prestigioso de las tecnologías emergentes en el ámbito de las TI (5), ha situado a CC desde el año 2008 hasta 2011 en el “pico de expectativas infladas”, mostrando así que los proveedores de TI han invertido confianza y dinero para desarrollar soluciones en este modelo, y que los usuarios tienen altas expectativas de lo que puede ofrecer CC tanto para las empresas como para el hogar.

### Tipos de *cloud computing*

Actualmente los servicios ofrecidos por la computación en la nube se pueden dividir en cuatro tipos, según las restricciones del acceso a los datos: nubes públicas, nubes privadas, nubes híbridas y nubes de comunidad. A continuación se describe brevemente cada una de ellas (tabla 2).

**Tabla 2**  
Descripción de los tipos de CC. Tomado y adaptado de Marks & Lozano (4)

Tipo de CC	Descripción
Nubes públicas	Son aquellas soluciones que ofrecen al público en general el servicio de consumo de recursos de TI a través de internet, ya sea pago o de manera gratuita (Google, Amazon, Yahoo!).
Nubes privadas	Son recursos de TI ofrecidos por empresas; cuentan con los mismos beneficios de CC, pero únicamente pueden consumirlos funcionarios de organizaciones privadas.
Nubes híbridas	La combinación de los conceptos de las públicas y privadas.
Nubes de comunidad	Son nubes públicas, organizadas, mantenidas y gestionadas por un grupo o comunidad con los mismos intereses.

## Capas de servicio

Los servicios consumidos a través de internet utilizando el modelo de CC se ofrecen en tres capas, diferenciadas según el tipo de servicio (6). Estas capas de servicio son:

- **IaaS – *Infrastructure as a Service*** (Infraestructura como un Servicio). Infraestructura *hardware* ofrecida a través de internet. Por ejemplo: servidores, ancho de banda, almacenamiento en disco, etc.
- **PaaS – *Platform as a Service*** (Plataforma como un Servicio). Ambientes de desarrollo y gestión *hardware*. Por ejemplo: sistemas operativos, motores de bases de datos, servidores HTTP, etc.
- **SaaS – *Software as a Service*** (*Software* como un Servicio). Aplicaciones para usuarios finales. Por ejemplo: mapas, gestores de almacenamiento en la nube, gestores de hojas de cálculo, álbumes de fotografías, etc.

## Cloud storage

Los servicios de *cloud storage* (CS), definidos como “una familia de servicios de archivo, respaldo y almacenamiento de documentos, incluso primario... que ofrecen al usuario limpias y simples interfaces de sistema de archivos, abstrayendo las complejidades de la gestión directa del *hardware*” (7) y como “sitios web de almacenamiento de datos en línea que ofrecen un lugar para guardar documentos, fotos y otra información a través de un servidor conectado a internet, dando a las personas una solución conveniente para las copias de seguridad, el intercambio de archivos y acceso a los datos sin la molestia de unidades externas de memoria” (8), se pueden ver como un conjunto de servicios de almacenamiento de archivos y documentos, a través de un explorador web, que ofrecen al usuario una experiencia similar a la de sistemas de archivos de escritorio.

Entre los servicios de CS más comunes en el mercado se encuentran Google Docs, Microsoft SkyDrive, Amazon S3, Dropbox y Yahoo! Zumo Drive. Éstos ofrecen almacenamiento a sus clientes desde 1 GB de capacidad hasta almacenamiento sin límites, y van desde ofertas gratuitas hasta arrendamientos de espacio en discos en línea por año. En Miller (6) se definen tres beneficios de CS por los cuales las grandes compañías

han decidido utilizar CS como solución para el almacenamiento de archivos y documentos:

- **Escalabilidad.** La capacidad de espacio de almacenamiento se puede incrementar o reducir cuando sea necesario, sin tener que adicionar más equipos o discos.
- **Confiabilidad.** Los datos, archivos y documentos siempre estarán disponibles. Para esto, los proveedores de servicios utilizan sistemas de copias de seguridad, que garantizan el acceso a los datos de los usuarios en cualquier ocasión.
- **Bajo costo.** Con los precios de los discos físicos cayendo cada día, es más rentable utilizar los servidores virtuales de la nube, en razón de que la escalabilidad ofrecida por éstos hace que la reasignación, expansión o reducción de espacio de almacenamiento para los usuarios sea más eficiente.

A pesar de los beneficios que se pueden obtener al utilizar CS, algunas organizaciones ven con cierto escepticismo este tipo de soluciones, debido en parte a que los encargados del manejo de la información siguen sin convencerse de su valor y sienten cierta incomodidad al mover su información a la nube (9). También hay ciertos temores referentes a la seguridad. La probabilidad de que la información contenida en los servicios de almacenamiento en línea sea robada por *hackers*, aunque sea mínima, existe.

## SITUACIÓN PROBLEMA

La Universidad Industrial de Santander (UIS) instituyó, por intermedio de la VIE, el programa de acreditación de laboratorios con el propósito de lograr la acreditación según la norma ISO 17025 en sus laboratorios científicos de análisis de muestras, para generar confianza a sus clientes y mejorar así la competitividad y productividad (10). A partir de la fundación del programa se han vinculado diez laboratorios pertenecientes a las facultades de Ciencias, Fisicomecánicas y Salud.

La gestión de la calidad, según la norma ISO 17025, se centra en cuatro aspectos fundamentales: referencias de normatividad; términos y definiciones, requisitos de gestión y requisitos técnicos. Al manejar estos aspectos dentro de sus entidades, algunos directivos de los laboratorios se percataron de la necesidad de estandarizar

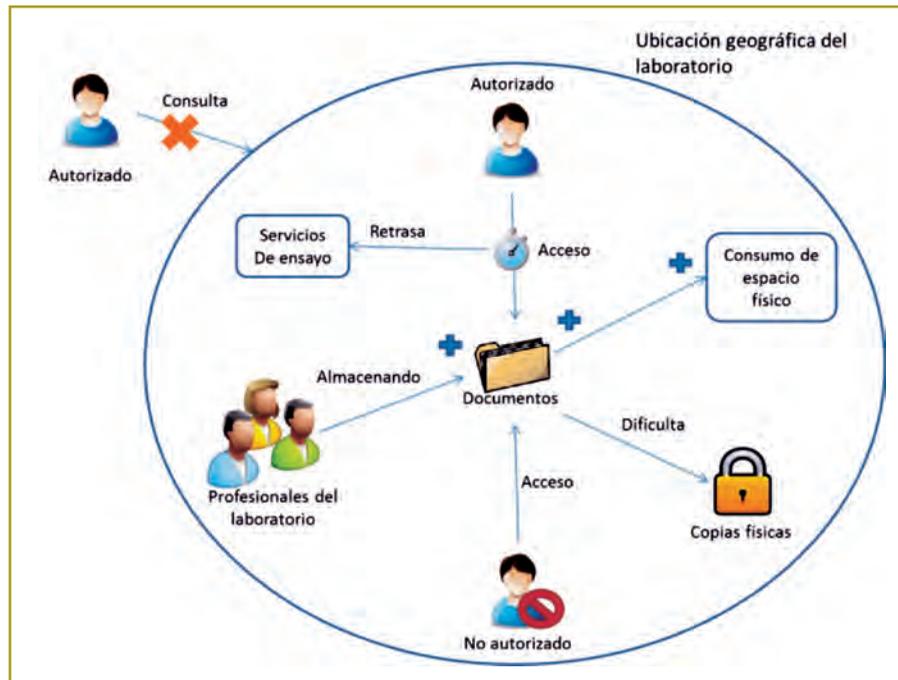


Figura 1. Situación problema.

los procesos y formularios, centralizar la gestión de información, y apoyar las rutinas de los sistemas de calidad; por lo tanto, sugirieron, en conjunto con el grupo de investigación STI<sup>4</sup>, adaptar la herramienta *software* Labcrom<sup>5</sup> para que diera soporte a la gestión de información de los servicios de ensayo en las entidades, propuesta que acogió la institución por intermedio de la VIE.

Antes de empezar con las labores correspondientes a la codificación de la herramienta, los autores del presente artículo elaboraron un análisis preliminar de la situación de los laboratorios involucrados para identificar las necesidades, problemas y oportunidades sobre los cuales se podría intervenir. Con la realización de dicho análisis salieron a la luz varias situaciones que hay que optimizar en los laboratorios, entre ellas la mejora de los sistemas de gestión de archivos y documentos.

Una tendencia observada en los laboratorios fue la dificultad de ejercer una eficiente gestión de documentos por parte de los profesionales de las entidades,

tanto en papel como en medios digitales. Los requisitos para la acreditación según las normas de gestión de la calidad comprometen a las instituciones a definir procedimientos que aseguren la confiabilidad, disponibilidad, integridad, confidencialidad y control de documentos. Por otra parte, los procesos de gestión de la calidad dentro de las organizaciones hacen necesario facilitar el intercambio de datos, información y conocimiento entre sus áreas.

Igualmente, se encontró que no existían procedimientos para la consulta de los documentos de una manera ágil y que la gente pudiera leerlos simultáneamente con autorización para hacerlo, sin importar la ubicación geográfica. Esto ocasionaba retrasos en las actividades cotidianas de los laboratorios, e incluso personas no autorizadas podían acceder a ciertos documentos. Así mismo, la cantidad de documentos crecía constantemente, obligando a las entidades a usar instalaciones para almacenar la documentación y, de alguna manera, mantenerla organizada y segura. A su vez, esto dificultaba la realización de copias físicas de cada documento para resguardar la información contra posibles siniestros (figura 1).

Por lo anteriormente descrito, fue preciso diseñar un sistema basado en los servicios de *cloud storage*, con el propósito de resolver los problemas de acceso a los

4. Grupo de Investigación en Sistemas y Tecnologías de Información.
5. Herramienta *software* para la gestión de información de los procesos de servicios de ensayo del Laboratorio de Cromatografía de la UIS.

documentos, como la simultaneidad, la búsqueda y la ubicación geográfica, problemas de seguridad, confiabilidad, confidencialidad y disponibilidad, así como también problemas de respaldo de la información. Todo esto con el fin de disminuir el tiempo para la creación, consulta y modificación de documentos, incrementar la productividad, dar soporte a los sistemas de gestión documental, ahorrar espacio físico en las instalaciones y aumentar la seguridad de la información, lo cual se ve reflejado en la satisfacción del cliente.

## METODOLOGÍA

La metodología utilizada para desarrollar el módulo de Gestión de Archivos en la herramienta HSLab constó de cinco fases: planeación, análisis, diseño, codificación e implantación. El tipo de metodología usado fue el evolutivo (11), que permite devolverse a una fase anterior si se detecta una inconsistencia o error, o si se desea mejorar algún aspecto del sistema (figura 2).

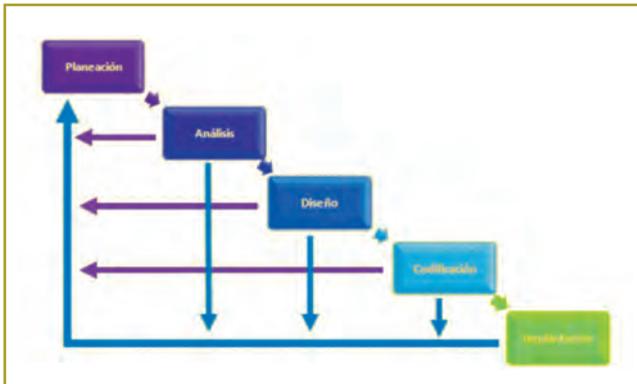


Figura 2. Tomada de [2].

A continuación se detallan las fases empleadas en la metodología, una por una.

### Planeación

Esta fase, en la que se planeó el desarrollo del módulo de Gestión de Archivos de HSLab, constó de las siguientes etapas.

- *Definición del problema.* Se logró definir el problema referente a la gestión documental por medio de visitas y reuniones con los profesionales de los laboratorios.
- *Definición de objetivos.* Partiendo de la definición del problema, se plantearon los objetivos del desarrollo del módulo.
- *Definición de la metodología.* Una vez definidos el problema y los objetivos, se escogió la metodología que se debía usar en el proyecto.
- *Realización del plan de trabajo.* Finalmente, se elaboró un documento en el que se plasmaron el planteamiento del problema, los objetivos, la metodología, el cronograma y el presupuesto del proyecto.

### Análisis

Esta fue la base para el desarrollo del módulo, puesto que en ella se identificaron las necesidades, falencias y oportunidades en las entidades que llevaron al diseño y codificación de éste. Las siguientes etapas formaron parte de esta fase.

- Entrevistas a cada uno de los investigadores de los laboratorios involucrados.
- Realización de informes de recopilación de información de entrevistas.
- Indagación sobre la situación problema referente a la gestión documental en los laboratorios
- Elaboración de modelos conceptuales de la situación problema (12) (13) (14) (15).
- Realización de la especificación de requisitos.

### Diseño

En esta fase se diseñó el módulo de HSLab referente a la gestión documental. Contó con las siguientes etapas.

- Realización de adaptaciones al diseño de la base de datos de HSLab para alojar las tablas referentes al módulo de gestión de archivos.
- Diseño del contenido de las carpetas utilizadas para guardar archivos y documentos por el uso del módulo.
- Definición de la interfaz de usuario y diseño de ayudas.

- Definición de controles, roles, perfiles y permisos de usuario para el acceso a los documentos contenidos en el módulo.
- Elaboración de diagramas de casos de uso, por medio del lenguaje de modelaje unificado (UML) (16), una vez realizadas las etapas anteriores.

### Codificación

Luego de haber diseñado el módulo de HSLab referente a la gestión de archivos, se ejecutó su codificación. Esta fase se elaboró siguiendo las etapas listadas a continuación.

- Codificación de las adaptaciones a la base de datos de HSLab en MySQL.
- Elaboración de interfaz de usuario en ambiente web.
- Elaboración del código en PHP 5.

### Implantación y pruebas

Para realizar esta fase en los laboratorios se ejecutaron las siguientes tareas:

- Instalación del módulo en el servidor del grupo de investigación STI. Realización de pruebas con documentos y archivos en diferentes formatos y comprobación de su correcto funcionamiento.
- Detección y corrección de errores de acuerdo con los resultados de las pruebas realizadas.
- Puesta en marcha.

## RESULTADOS

La gestión de documentos manejada a través del módulo de HSLab desarrollado para soportar esa tarea permite a los laboratorios gestionar los documentos relacionados con los sistemas de gestión de calidad, servicio de ensayo y muestreo en un ambiente amigable para el usuario, facilitando su uso, agilizando las consultas a los documentos, y asegurando su confiabilidad, confidencialidad e integridad.

La incorporación de *cloud storage* en el desarrollo del módulo de gestión de archivos de HSLab permite la disponibilidad de los documentos en todo momento, desde

cualquier lugar. También proporciona compatibilidad entre los sistemas operativos desarrollados para computadores (Windows, Mac OS, Linux, etc.), así como para dispositivos móviles con capacidad de acceder a contenidos en internet a través de un explorador web (Android, BlackBerry, Nokia, iPhone, etc.).

Con los controles de seguridad de HSLab, los archivos y documentos almacenados en el disco virtual creado en el módulo de gestión de archivos están protegidos contra accesos de usuarios sin autorización, ataques de *hackers* y pérdida de información.

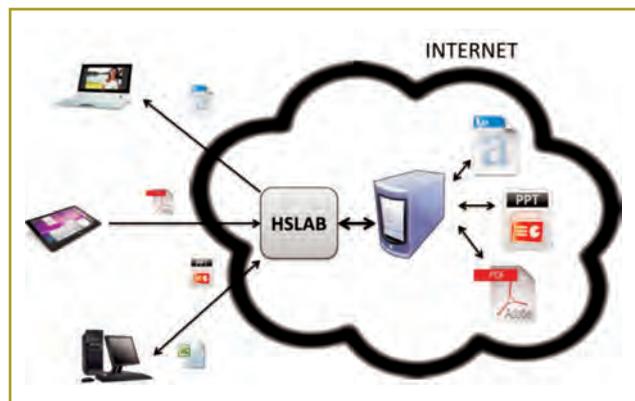


Figura 3. Esquema de gestión de archivos HSLab.

Además, al estar el módulo de gestión de archivos integrado con HSLab, facilita la consulta de los documentos anexos por número de recepción, o por orden de trabajo asignada al servicio, lo que agiliza los tiempos de consulta y reduce los tiempos de ejecución de ensayos, en caso de que éstos requieran información de servicios anteriores, logrando así una mayor satisfacción de los clientes. La situación observada después de desarrollar e implantar el módulo de gestión de archivos de HSLab se puede detallar más adelante (figura 4).

Al igual que el resto de la herramienta *software* HSLab, el módulo de gestión de archivos se desarrolló bajo el lenguaje de programación PHP 5, utilizando el motor de bases de datos MySQL, aplicando el protocolo de envío de mensajes SOAP y ejecutándose bajo el sistema operativo Microsoft Windows® Server 2008.

A continuación se presentan algunas funciones del módulo de gestión de archivos de HSLab.

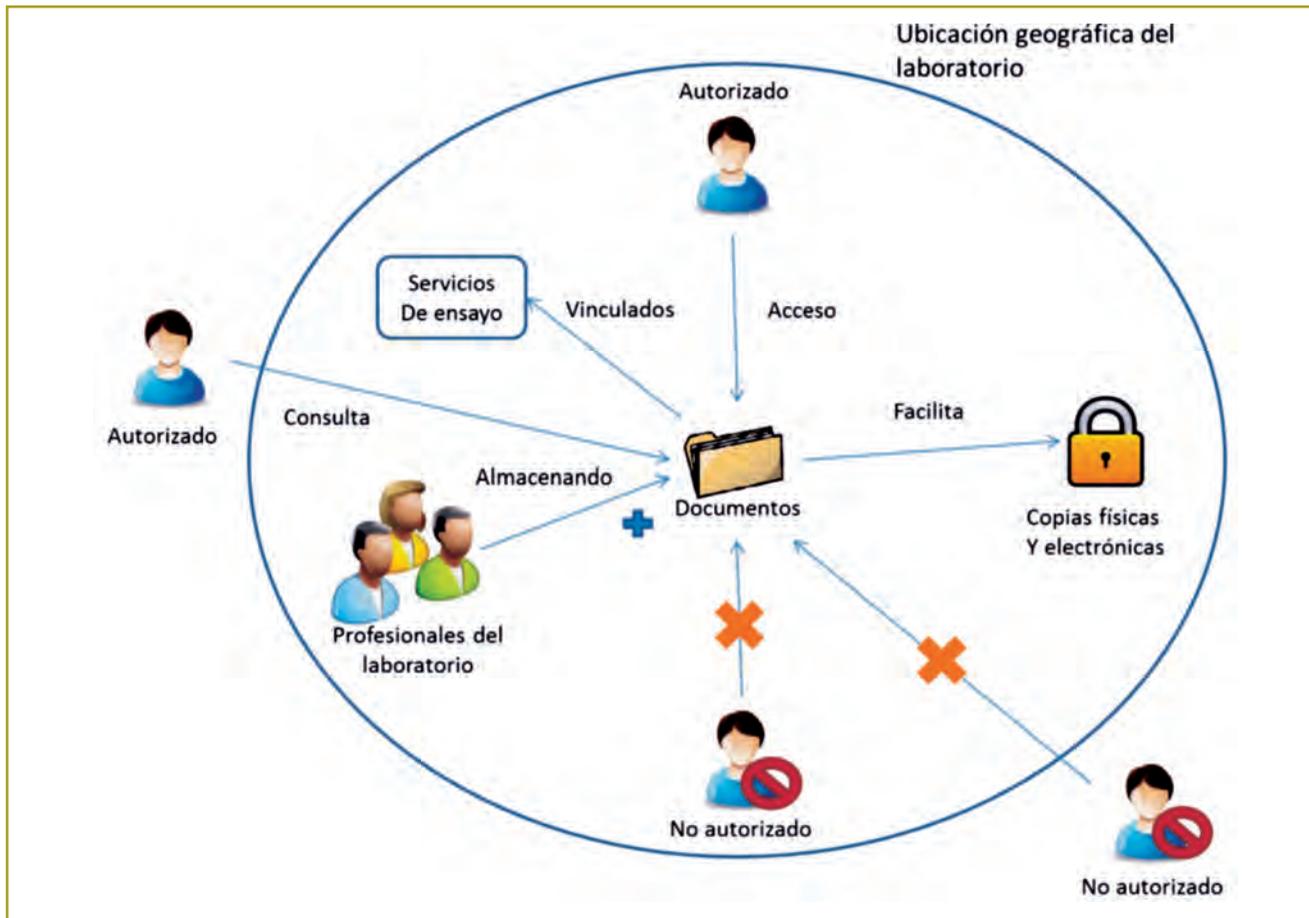


Figura 4. Situación después del desarrollo del módulo.

### Asociación de informes a servicios de ensayo

La asociación de documentos de informes de resultados a servicios de ensayo es una de las funciones fundamentales del módulo de gestión de archivos, debido a que permite la consulta rápida de documentos, ya sean

informes de resultados, anexos, ofertas, reporte de errores, o cualquier otro tipo de documento vinculado a un servicio de ensayo específico.

Se puede asociar un documento a una orden de servicio, utilizando el formulario de Carga de archivos, ubicado en la sección “Informe” de la categoría “Etapas del servicio” del menú “Servicio de ensayo”.



Figura 5. Diagrama de arquitectura de HSLab.

### Consulta de documentos por orden de servicio

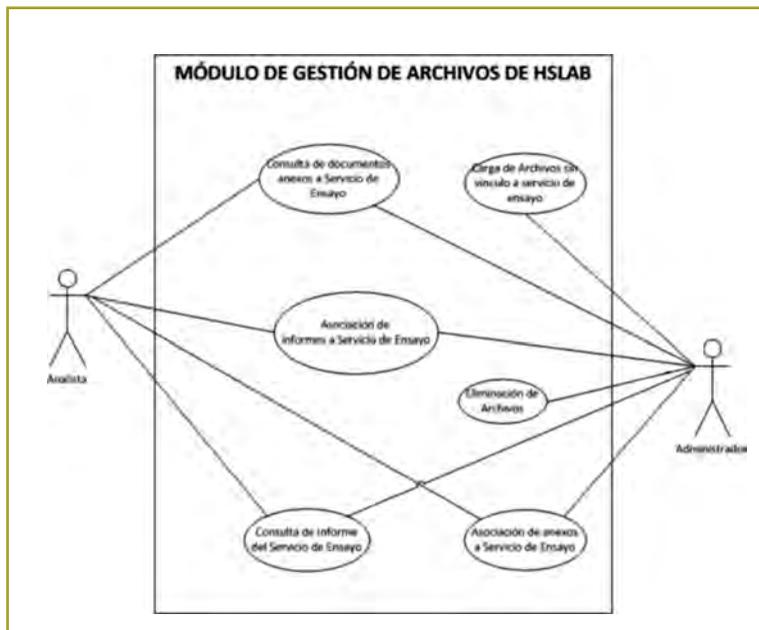
La consulta de documentos ubicados por el número asignado a la orden de servicio agiliza las tareas de consulta de archivos o informes de resultados. Se puede consultar un documento asociado a una orden de servicio, utilizando el vínculo del formulario de Carga de archivos, “Aquí”, ubicado en la sección “Informe” de la categoría “Etapas del servicio” del menú “Servicio de ensayo”. Esta opción despliega una ventana que muestra todos los archivos asociados a la orden de

servicio, los que a su vez se pueden suprimir utilizando el botón eliminar.

### Gestión general de archivos

En el panel de gestión general del módulo de gestión de archivos de la herramienta *software* HSLab, se pueden cargar, descargar y eliminar documentos sin ningún vínculo con órdenes de servicio; tal es el caso de los documentos referentes al sistema de gestión de calidad, manuales, actas, etc. A esta opción se puede acceder desde el menú principal, en la opción “Archivos”. Por motivos de seguridad, únicamente los administradores del sistema pueden acceder a los documentos.

A continuación se muestra el diagrama de casos de uso UML de las funciones del módulo de gestión de archivos de HSLab (figura 6).



**Figura 6.** Diagrama de casos de uso UML del módulo de gestión de archivos de HSLab.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se identificaron falencias en la gestión documental de los laboratorios de análisis de muestras expuestos en el artículo, debido a la falta de estrategias para el manejo de sus archivos, que involucraran TI. Por esto fue prudente la intervención de los autores al desarrollar e implantar

el módulo de gestión de archivos de HSLab, para dar soporte a esta labor.

A nivel académico, este proyecto apuntó a enriquecer el área de investigación de “Desarrollo organizacional basado en sistemas y tecnologías de la información”, del Grupo de Investigación en Sistemas y Tecnología de la Información (STI) de la Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

Se espera desarrollar un módulo que permita realizar la gestión de datos concernientes al muestreo de los laboratorios que opere en dispositivos móviles, así como también un módulo para la gestión del conocimiento en estas entidades, de manera que se enriquezca la herramienta y se le dé valor adicional.

Se recomienda que los laboratorios que hacen uso de la herramienta *software* programen actividades de capacitación de HSLab, con el fin de garantizar el funcionamiento de la herramienta, al igual que del módulo de gestión de archivos, para evitar así inconvenientes por su mal uso.

Ojalá que otros laboratorios dentro y fuera de la UIS puedan hacer uso de los servicios ofrecidos por HSLab y el módulo de gestión de archivos, de modo que puedan soportar su gestión documental con esta herramienta *software*.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Dzuraidah, Ab Rahman, Shokshok, Mohd Nizam & Abd Wahab, Mostafa (2011). *Barriers and Benefits of Total Quality Management Implementation in Libyan Manufacturing Companies*. Bangi: Idosi Publications.
2. Ramírez Gómez, Herman & De la Hoz Freyle, Javier Enrique (2010). *Herramienta software basada en la arquitectura SOA para el control de procesos del servicio de ensayo y mantenimiento de equipos del Laboratorio de Cromatografía de la Universidad Industrial de Santander*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
3. Gartner (2008). *Cloud Computing: Special Report*.
4. Marks, Erick & Lozano, Bob (2010). *Executives Guide to Cloud Computing*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
5. Gartner. *Hype Cycle of Emerging Technologies*. s.l.: Gartner.
6. Miller, Michael (2008). *Cloud Computing, Web-Based Applications that Change the Way You Work and Collaborate Online*. Indianapolis: QUE.
7. Hail (2009). *A High Availability and Integrity Layer for Cloud Storage*. Bowers, Kevin, Juels, Ari & Oprea, Alina. New York: s.n. Proceedings of the 16th ACM Conference on Computer and Communications Security.
8. Bartlett, Beth (2010). Definition of Online Storage. [Online] eHow, 2010. [Cited: agosto 2, 2011.] [http://www.ehow.com/about\\_5150376\\_definition-online-storage.html](http://www.ehow.com/about_5150376_definition-online-storage.html).

9. SearchCloudStorage.com. Understanding cloud storage technology: Definitions, deployment and implementation challenges. [Online] SearchCloudStorage.com, 2010. [Cited: agosto 02, 2011.] <http://searchcloudstorage.techtarget.com/report/Understanding-cloud-storage-technology-Definitions-deployment-and-implementation-challenges>.
10. Vicerrectoría de Investigación y Extensión. Acreditación Laboratorios. [Online] Universidad Industrial de Santander. [Cited: agosto 02, 2011.] <http://www.uis.edu.co/webUIS/es/investigacionExtension/acreditacionLaboratorios/index.html>.
11. Sommerville, Ian (2005). *Ingeniería del software*. Madrid: Pearson Addison Wesley.
12. *Metwill: un aporte al aprendizaje de la metodología de sistemas blandos para el establecimiento de requerimientos de información*. Olave, Yesid Alexander, Gómez, Luis Carlos & Ortiz, Diego Leonard (2007). *UIS Ingenierías*, vol. 6, pp. 20-31.
13. *Modelamiento conceptual e implantación de una plataforma Teamware para el soporte de las actividades del Consultorio Jurídico UIS*. González, Mayda Patricia et ál. (2007). *UIS Ingenierías*, vol. 6, pp. 9-23.
14. Galvis, Ernesto, González, Mayda Patricia & Gómez, Luis Carlos (2007). Aprendizaje organizacional y sistemas de información en la práctica: una experiencia en el Consultorio Jurídico de la Universidad Industrial de Santander (CJ-UIS). *Scientia et Technica*, vol. 13, pp. 409-414.
15. González, Mayda Patricia, Gómez, Luis Carlos & González, Olga Cecilia (2007). Propuesta de un modelo conceptual de sistema de información para el Consultorio Jurídico de la UIS. *Scientia et Technica*, vol. 13, pp. 442-448.
16. UML. Unified Modelling Language. [Online] OMG Standards. [Cited: septiembre 05, 2011.] <http://www.uml.org/>.
17. Cloud Computing Use Case Discussion Group. Cloud Computing Use Cases. [Online] Agosto 5, 2009. [Cited: Agosto 4, 2011.] <http://groups.google.com/group/cloud-computing-use-cases>.
18. *Cloud computing: Challenges and future directions* (2010). Kim-Kwang & Raymond Choo. Canberra: s.n. Trends & issues in crime and criminal justice, p. 8.
19. *Reviewing Some Platforms in Cloud Computing*. Nagaprasad, S. et ál. (2010). *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 2, pp. 348-353.

# Determination of biochemical and physical conditions of plastics denominated as “biodegradable” subjected to anaerobic conditions

LORENA I. ALBARRACÍN LÓPEZ<sup>1</sup>, ALBERTO URIBE JONGBLOED<sup>1</sup>, J. ALEJANDRO PUENTES PARODI<sup>2</sup>

1. Centro de Estudios Ambientales, Facultad de Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, D.C., Colombia.

2. Corresponding author. Centro de Estudios de Tecnología e Innovación de Ingeniería Industrial, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, D.C., Colombia.

lorena.albarracin@mail.escuelaing.edu.co, alberto.uribe@escuelaing.edu.co, jaime.puentes@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/08/2012 Aceptado: 23/08/2012

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

## Abstract

The main objective of the study was to determine the biochemical and physical conditions of two different types of polymeric materials (HDPE with oxo-additive and PLA) when subjected to conditions similar to those presented inside a sanitary landfill. These materials are commercialized within the country claiming to be biodegradable under certain conditions. However, the conditions in which such degradation may occur are completely unknown from those presented inside a solid waste final disposal site (sanitary landfill).

The experiment simulated the general conditions to which the materials would be subjected once inside a sanitary landfill, (absence of molecular oxygen, absence of light, constant temperature, high humidity, among others). Changes in biochemical and physical conditions were monitored as well as the container. These changes may indicate degradation of the polymers. Along the experiment, not enough evidence could be observed that doubtlessly showed actual biodegradation in any of the plastic materials tested.

**Keywords:** polylactic acid (PLA), HDPE with additive, anaerobic biodegradation, biodegradability, landfill, oxo additives.

## 1. INTRODUCTION

Plastic materials are of great use and versatility thanks to their chemical and physical properties, including resistance to degradation. However, when these materials become waste those same properties make them a complex environmental problem (Aboud-Zeid et al. 2001). To solve this problem two fundamentally different solutions, among others, have been proposed: the addition of chemical catalysts to the actual polyolefin or the use of polymers developed from substances susceptible to biodegradation. In the first case, adding a metallic salt, as catalyst during the manufacture of the polymer, leads to the claim (according to the manufacturers of the additive) that complete degradation/biodegradation of the polymer will occur when complying with the standard procedures ASTM D882-02, D883-08, D3826-98 and D6954-04. To fulfill the requirements stated in the standards certain controlled conditions such as presence of molecular oxygen, high temperature, light intensity and physical stress should be guaranteed in order to obtain the first step of degradation and to facilitate biological attack (Itävaara et al. 2002). These conditions never occur within a regular waste management facility (sanitary landfill) like the ones in operation in developing countries like Colombia. Furthermore, the manufacturer's statement confuses the public, who ignores the specific chemical, physical and biochemical differences between the conditions of the standard tests and those presented in the landfill, causing them to believe that the degradation will occur even within the sanitary landfill.

For the second case, some studies have demonstrated the occurrence of biodegradation phenomena. However, there has not been any previous research that proves its occurrence with materials and products sold within developing countries.

The main intention of this study is to investigate the chemical and physical behavior of the referred materials when subjected to anaerobic conditions simulating those presented within a sanitary landfill similar to the ones existing in Bogotá, D.C.

The polymeric materials used in this work were blown film extruded high-density polyethylene (HDPE) with a suitable synthetic oxo-catalist and a "biodegradable" polymer derived from starch, in this case polylactic acid (PLA), also blown film extruded. Both of them are available in the local market.

Changes in mass, coupled with gas generation and changes in mechanical properties, were taken into account, primarily to observe a possible degradation of the samples. Other complementary and supplementary measurements were taken in order to confirm the occurrence of chemical processes in the bulk.

## 2. MATERIALS AND METHODS

Two types of plastic materials were chosen for this study: Polylactic Acid also known as PLA and High-Density Polyethylene (HDPE) with Oxo-additive.

### 2.1 Polylactic Acid, PLA

PLA is a thermoplastic polyester with a molecular structure as represented in figure 1, with its main building block being lactic acid. This polymer is manufactured from renewable resources such as corn, beets, wheat and other starch-rich products, where its denomination "of natural origin" comes from. It has been extensively used in the food, chemical and pharmaceutical industries as well as in agriculture, animal food and plastic sectors, among others (Serna et al.2003). The samples taken for this particular study were taken from bags made for the food packaging industry.

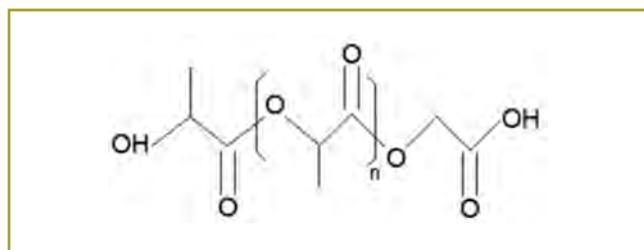
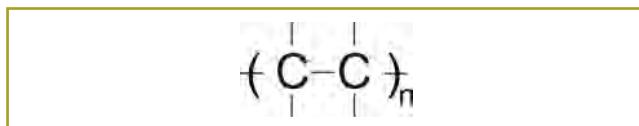


Figure 1. Molecular structure of Polylactic Acid – PLA.

### 2.2 High Density Polyethylene (HDPE) with oxo-additive, Oxo-HDPE

HDPE is a polyolefin from synthetic origin. It is represented by its repetitive unit  $(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n$ , (see figure 2). It is obtained from the polymerization of ethene (ethylene) (chemical formula  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ), from which

it derives its name. The polymer used here has been additivated and it is commercially available as Oxo-HDPE. This denomination of oxo-degradable, according to the manufacturers, comes from the addition to the polymeric structure of a metallic salt that acts as an oxo-catalyst for the degradation of the polymer itself



**Figure 2.** Molecular structure of HDPE.

### 2.3 Plastic Samples

For both types of plastic material, several standard size samples were made.

Each sample was 2.54 cm wide by 25.4 cm long (1x10 inches), according to the stated requirements of standard test ASTM D882. This particular size configuration is used to determine the modulus of elasticity for this kind of material under mechanical stress-strain – tension tests. These same pieces allowed us to check the evolution of mass.

Other plastic samples were made in the form of small circles of 5.0 mm diameter. These samples were used to monitor the variation in the Chemical Oxygen Demand (COD) of the plastic itself and to make visual inspections of the polymeric structure under optical microscope.

### 2.4 Anaerobic Sludges

The anaerobic sludge (biomass) used within the experiment was monitored with identical periodicity, as the

plastic material, in order to assess biodegradation of the samples. The parameters observed were dissolved and total COD; Total and Volatile Suspended Solids (TS and VSS, respectively); nitrates  $\text{NO}_3^-$ ; sulfates,  $\text{SO}_4^{2-}$  and biogas production were determined according to similar methodologies taken from several researchers. (Aboud-Zeid et al. 2001; Agamuthu et al. 2005; Imam et al. 1999; Itävaara et al 1996; Itävaara et al. 2002; Massardier-Nageotte et al 2006; Mohee et al. 2008; Sha et al. 2008).

### 2.5 Experiment

Both PLA and Oxo-HDPE were subjected to anaerobic conditions by submerging them into anaerobic sludge inoculated with biomass taken from a primary sludge digester from the local wastewater treatment plant. This methodology is similar to those reported in the literature (Aboud-Zeid et al. 2001; Agamuthu et al. 2005; Imam et al. 1999; Itävaara et al 1996; Itävaara et al. 2002; Massardier-Nageotte et al 2006; Mohee et al. 2008; Sha et al. 2008; Serna et al. 2003).

250 ml Erlenmeyer flasks were used as reactors. Each flask was filled with sludge (6000 mg/l initial TS concentration), mineral media (See tables 1 and 2), and then the plastic samples were introduced; an identical procedure was followed to make a replicate set and two controls were also prepared. The first control set (positive control) contained sludge and mineral media, but no plastic; the second control set (negative control) contained sterile mineral media and plastic samples but no biomass. The flasks were sealed with rubber stoppers from which a plastic PVC tube was connected to the gas collection system. For every single set (experimental, replicate and both controls) almost all parameters were

**Table 1**  
Composition of the Mineral Media

Component	Initial Concentration (mg/l)	Component	Initial Concentration (mg/l)
MgCl <sub>2</sub> •6H <sub>2</sub> O	1000	NaHCO <sub>3</sub>	4200
CaCl <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O	143	NaCl	1000
KCl	1200	NaNO <sub>3</sub>	2740
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	205	Na <sub>2</sub> S•9H <sub>2</sub> O	370
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2840	Trace*	1,0 ml/l
NH <sub>4</sub> Cl	270		

\*Trace Solution

**Table 2**  
Trace Solution Composition

Component	Initial Concentration (mg/l)	Component	Initial Concentration (mg/l)
C6H9NO6	3500	CuCl <sub>2</sub> •6H <sub>2</sub> O	130
H3BO3	62	ZnCl <sub>2</sub>	68
MnCl <sub>2</sub> •4H <sub>2</sub> O	98	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> •2H <sub>2</sub> O	24
FeCl <sub>2</sub> •4H <sub>2</sub> O	1500	Beef Extract	1000
CoCl <sub>2</sub> •6H <sub>2</sub> O	120	NiCl <sub>2</sub> •6H <sub>2</sub> O	240

measured every other week, excepting gas production and temperature readings that were taken daily.

The experiment was carried out for a period of six months. The gas production was measured through the inverted cylinder method consisting in two graduated cylinders (one 500 ml and the other 250 ml) in which the small one is put upside down inside the big one, with the plastic tubing going inside the small submerged cylinder. The cylinder system was filled with an acid solution saturated with sodium chloride in order to avoid dissolution of the carbon dioxide from the biogas. The gas was then confined and the production was measured by means of the displaced liquid volume inside the small cylinder. The accumulated biogas production was recorded daily.

To guarantee absence of light and complete anaerobic conditions all sets were introduced in glass chambers covered with aluminum foil and depleted of air. Three chambers were prepared, one containing the Oxo-HDPE tests, one with PLA tests and one holding the control sets for both materials.

The experiment was set to simulate the conditions presented within a sanitary landfill in the city of Bogotá, D.C., which meant that the temperature was kept close to 20 °C or slightly below in the psychrophilic range.

Sixty days after the beginning of the experiment a sludge addition was made given the fact that the data recorded up to that moment suggested inhibition of the biomass.

All parameters were measured following standard procedures (Standard Methods for the Characterization of Water and Wastewater, 20<sup>th</sup> Ed.) and the experimental procedure was performed following indications of the ASTM5526. 1994; ASTM D5511. 2002 and ASTM D882. 2002 specific for this type of systems.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

To determine the extent of degradation/biodegradation of the plastic materials the parameters of mass, modulus of elasticity, stress and deformation as well as visual inspection under the microscope were monitored with respect to time.

At the same time, the sludge (in charge of the potential biodegradation) was monitored for total and dissolved COD, Total Solids (TS); Volatile suspended solids (VSS); nitrate concentration, sulfate concentration and biogas production.

#### 3.1 Biodegradation analysis

In order to be able to determine the extent of biodegradation (if any) it is important to know the initial conditions in which the experiment began to compare them to the data recovered over time, and assess the occurrence of the phenomenon and the extent to which it occurred.

##### Initial conditions PLA

Sample Measurements	:	2.54 cm x 25.4 cm x 0.023 mm
Initial mass	:	156 ±3.4 g
Modulus of elasticity	:	2636 MPa
Deformation (Max)	:	5,08 %

##### Initial conditions oxo-HDPE

Sample Measurements	:	2.54 cm x 25.4 cm x 0.018 mm
Initial mass	:	95 ±5 g
Modulus of elasticity	:	417 MPa
Deformation (Max)	:	144 %

### Initial conditions Biomass

Dissolved COD	: 323 mg/L
Total Solids	: 6323 mg/L
Volatile suspended solids	: 3250 mg/L
Nitrates	: 1370 mg/L
Sulfates	: 1420 mg/L

### 3.2 Mass Variation

Figure 3 shows the relative mass variation for the PLA samples. The results suggest a coupled physical and biological effect, since a greater variation of mass has been observed with respect to the time in the samples subjected to biological activity, as compared to the same parameter variation in the negative control. It can be said that there is a physical effect by the submersion in the media (observations of the negative control) and an additional effect given by the biological activity. The samples subjected to biological activity showed a variation of mass of 3.8 g, a net loss of 2.4% of the initial mass. The negative control showed a cumulative mass loss of 0.8 g, equivalent to a 0.84% loss compared to the initial mass.

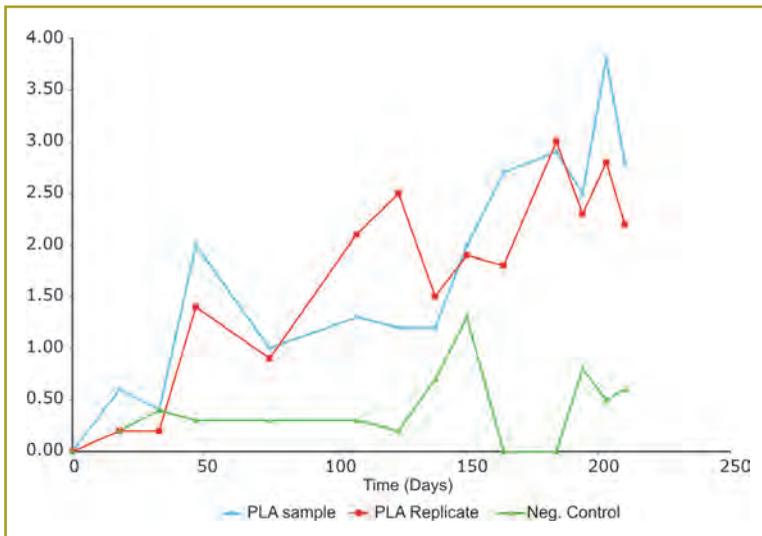


Figure 3. Mass variation for PLA.

Observations made for the Oxo-HDPE samples (see figure 4) do not show a behavior similar to the one reported for PLA. Both the tested samples and the negative control show a very small and practically identi-

cal mass variation that could be due more to side effects of the recovery and cleaning procedures than actual degradation. According to this analysis it is considered that no effect was observed for this kind of material.

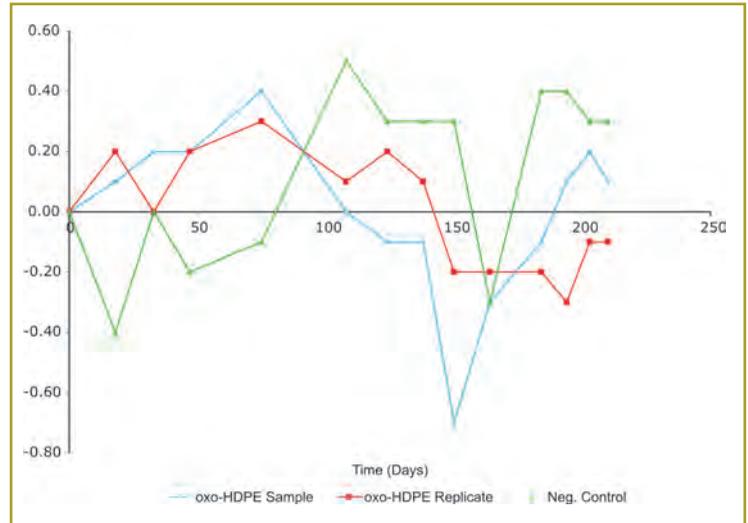


Figure 4. Mass variation for Oxo-HDPE.

### 3.3 Correlation Between the Measured COD and Materials Degradation

A correlation between the development of the dissolved COD against the mass loss of the plastic samples was to be established. The working hypothesis considered the solubilization of parts of the polymer as the first step for biological degradation, implying that an increase in the dissolved COD concentration must be coupled with a loss of mass from the plastic samples.

As shown in figure 5 the dissolved COD has an upward tendency during the first 164 days of the experiment. However, this tendency is observed for both PLA and Oxo-HDPE samples as well as for the positive control. Although PLA showed a small but significant mass loss that might have been correlated with this result, Oxo-HDPE and the positive control showed no significant difference in their variation of the same parameter when compared with the PLA experiment, suggesting that another effect should have to be considered. As it will be shown later, endogenous decay is the probable phenomenon describing this behavior. From day 164 on, the decrease in the concentration of

dissolved COD for all samples and controls is consistent with the late stages of endogenous decay rather than actual plastic substrate utilization. This observation also correlates to the behavior of Total and Volatile Suspended Solids.

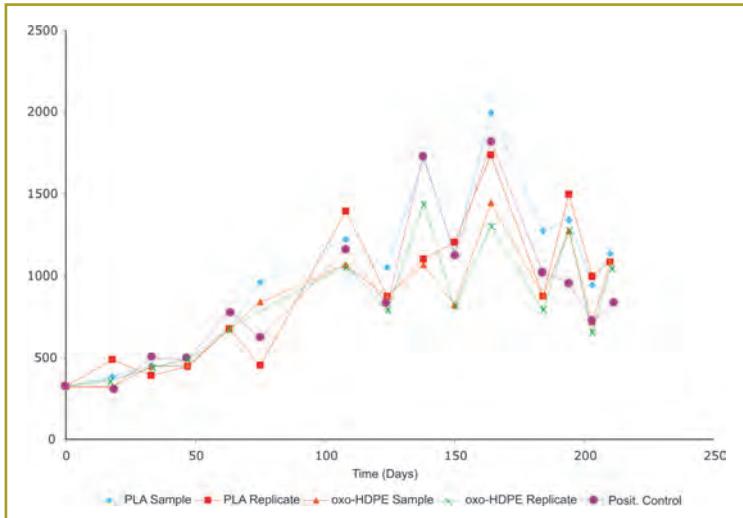


Figure 5. Development of the dissolved COD.

### 3.4 Solids Behavior (TS y VSS)

With the development of TS and VSS parameters, what is happening with the biomass can be addressed. During the first two months of the experiment the volatile fraction of the solids decreases significantly, indicating a decrease in the bacterial population, consistent with endogenous decay. Bacteria is not using the plastic material as carbon source but themselves (see figure 6). After day 60 more biomass was added to the systems, reflected in the measured concentrations of both parameters (see figures 6 and 7). The addition of biomass was aimed at increasing the overall observed rate of degradation of the plastic material (if any). The overall effect observed was a confirmation of the endogenous decay hypothesis.

### 3.5 Development of the Electron Acceptors

Nitrate and sulfate are electron acceptors essential for facultative and anaerobic cellular respiration respectively. Figure 8 shows that during the first 60 days the

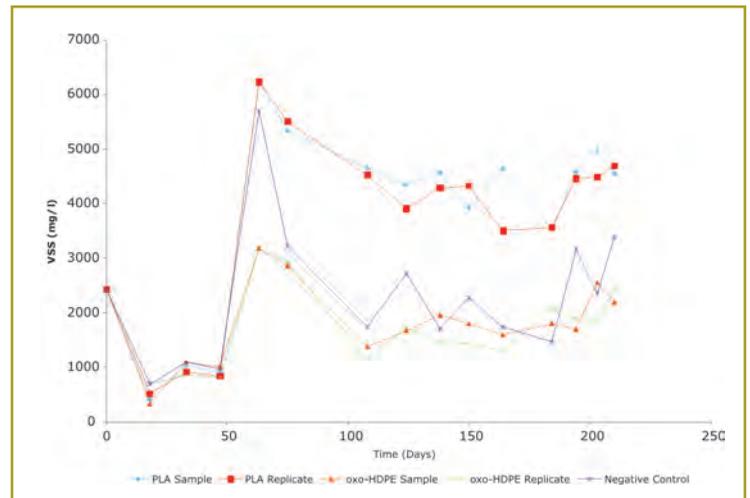


Figure 6. Development of Volatile Suspended Solids (VSS).

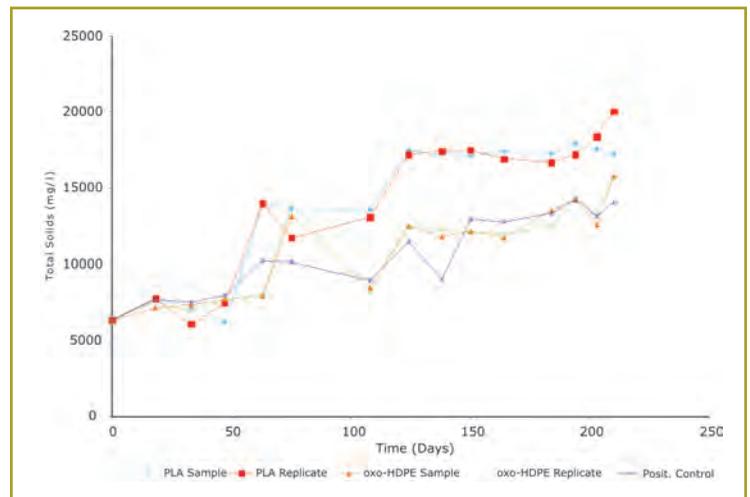


Figure 7. Development of Total Solids (TS).

concentration of nitrate remains rather constant, suggesting the absence of facultative denitrifying bacteria. After the sludge addition, there is an evident nitrate consumption, even to the edge of depletion, indicating heavy denitrifying conditions.

Sulfate (figure 9) shows a similar behavior as the one seen for nitrate, in this case, however, the sulfate reduction occurred at all times during the length of the experiment. At around day 110 an addition of both nitrate and sulfate at levels close to those of the initial condition was performed. The purpose of the addition was to address the possibility of system inhibition caused by lack of electron acceptors.

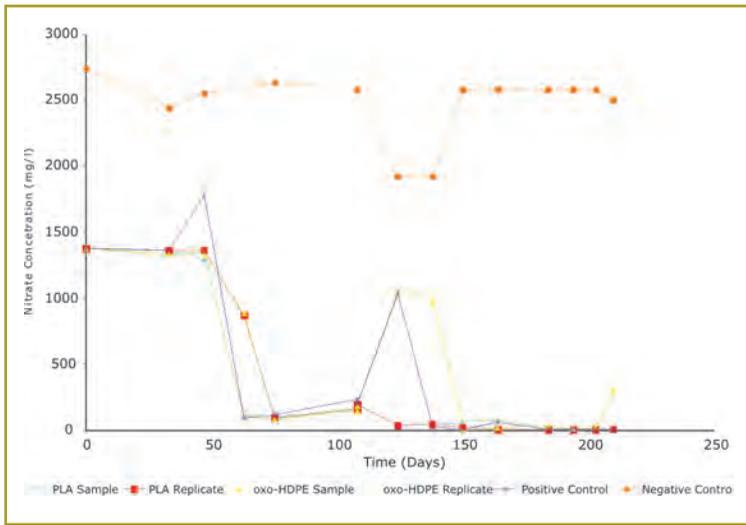


Figure 8. Development of Nitrate Concentration.

The observed consumption of electron acceptors coupled with gas production demonstrated that the systems were alive and active but the carbon source was not the plastic material being tested.

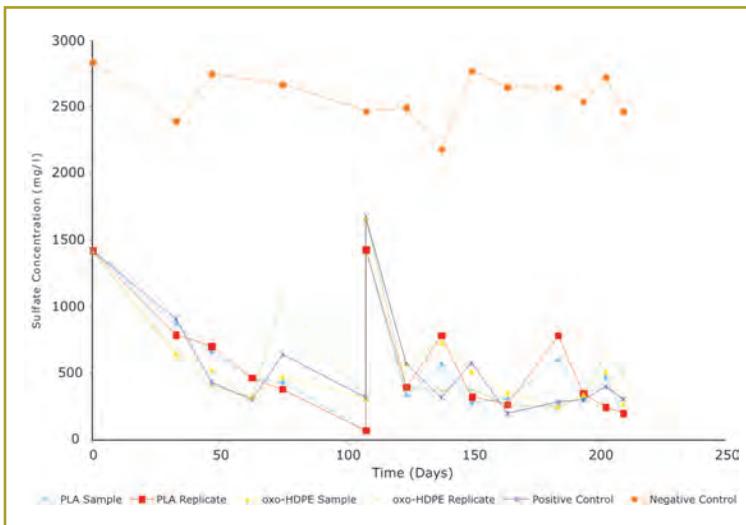


Figure 9. Development of Sulfate Concentration.

### 3.6 Biogas Production

The conditions under which the biomass was to perform the degradation were very strict. The only source of carbon (besides the biomass itself) was the plastic material being tested (either PLA or Oxo-HDPE). There was no co-substrate, only mineral salts and some

electron acceptors available for their vital functions. If any degradation was to occur, bacteria should be converting those complex polymeric substances into biogas (mainly methane and carbon dioxide).

Figure 10 depicts the development of biogas production. The acclimation phase can be observed to have lasted close to two months (low gas yield). After the sludge addition, the gas production rate greatly increased, mainly due to the presence of organic matter in the sludge itself at the time of the addition. After a while, the gas production rate decreased entering a stagnant phase similar to a second lag phase. Finally a behavior consistent with endogenous decay was shown, in which the gas production rate increased measurably but could not be associated to anything different but the loss of biomass.

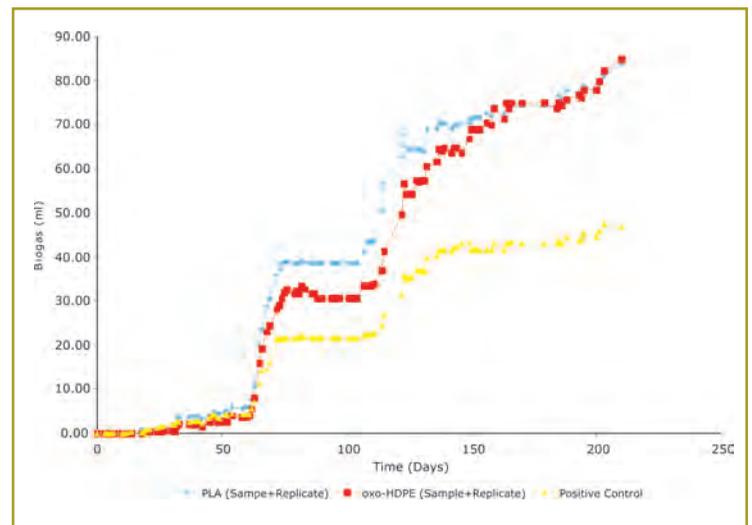


Figure 10. Cumulative Biogas Production.

### 3.7 Mechanical properties

Figures 11 through 14 depict the tendency to maintain a constant value of the modulus of elasticity; therefore, showing no sign of degradation. If any degradation had happened, the material should have become stiffer and more fragile, due to the fact that the polymeric chains would have fractured and the resulting fractions, being under chemical disequilibrium, would have bound with other fractions of carbon chains originating three-dimensional interchaining, reducing the molecular weight of the polymer. This degradative behavior is observed

by a stiffening of the polymeric structure (reduction of the modulus of elasticity). At the same time, had the degradation occurred, a significant reduction in the ductility of the material should have been observed. None of the cases shows results in favor of the previously stated argument, which means that no distinguishable degradation could be observed.

The high dispersion of the data can be explained by the difference in the position of the plastic sample when subjected to the tensile stress test, internal holes in the plastic sheet due to manufacturing processes and to errors in cutting the sample in an exact and accurate manner.

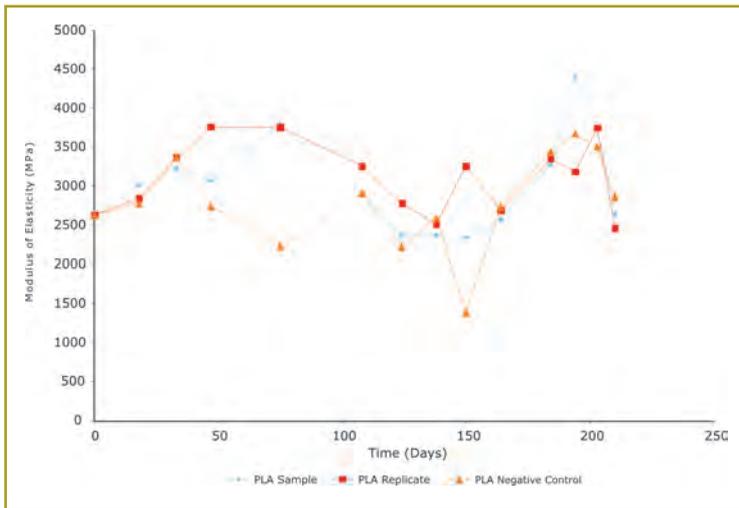


Figure 11. Modulus of Elasticity (PLA).

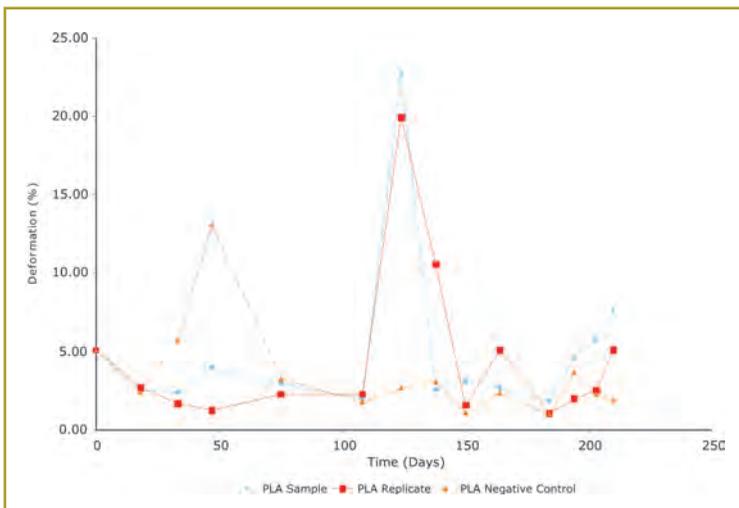


Figure 12. Maximum Deformation (PLA).

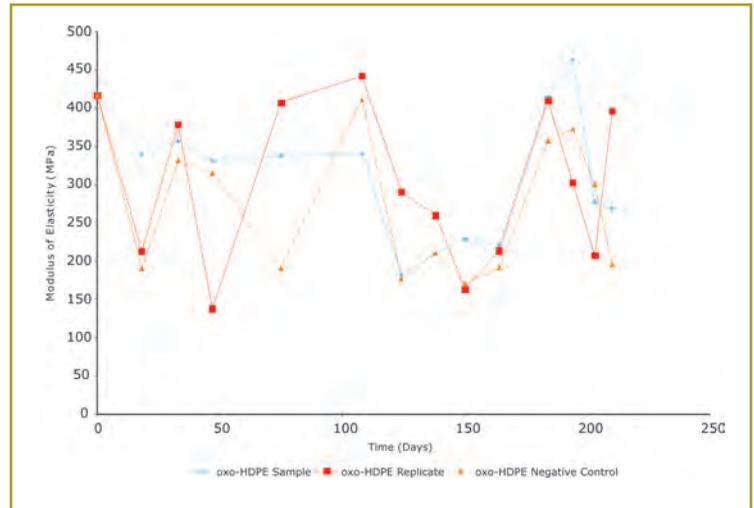


Figure 13. Modulus of Elasticity (Oxo-HDPE).

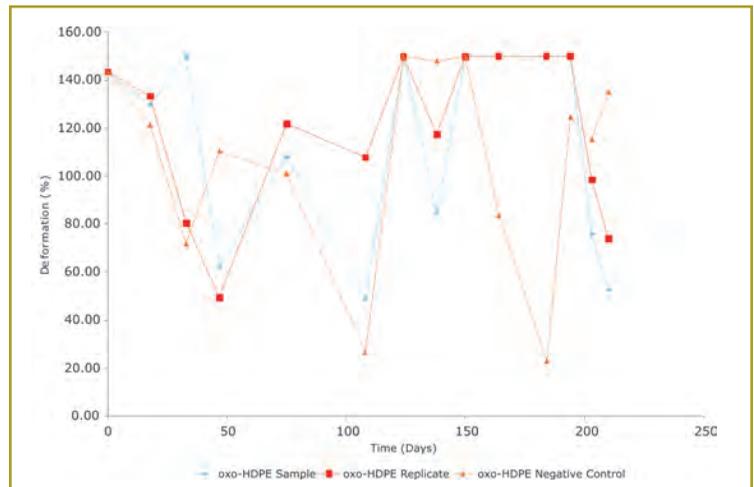
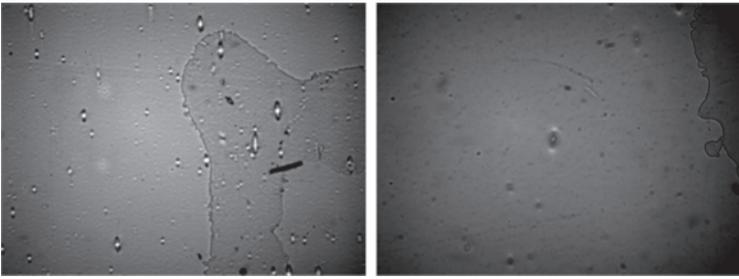


Figure 14. Maximum Deformation (Oxo-HDPE).

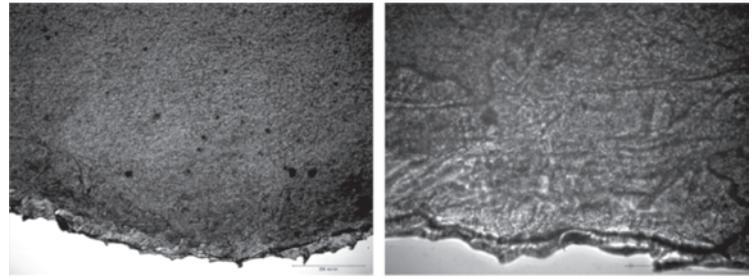
### 3.8 Optical Micrographs

Observation under optical microscope of the PLA samples (figures 15 through 17) shows that the structural integrity of the material is intact even though the material was subjected to the experimental conditions a couple of weeks (figure 15); two and a half months (figure 16) and six months (figure 17). There was no visual evidence of degradation.

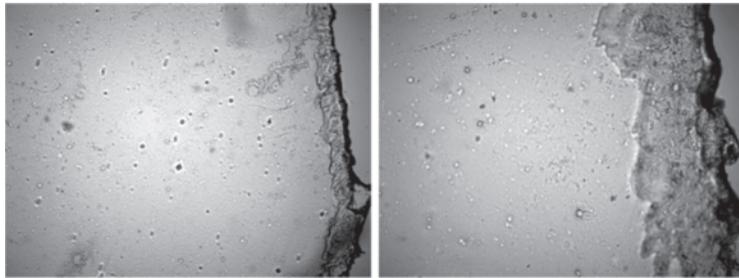
The optical microphotographs allow to see that the Oxo-HDPE is semicrystalline. Little spherules, characteristic of this type of material, are clearly distinguishable. There are no holes or microvoids or cracks within the material indicating biodegradation or biological attack during the length of the experiment (see figures 18 through 20).



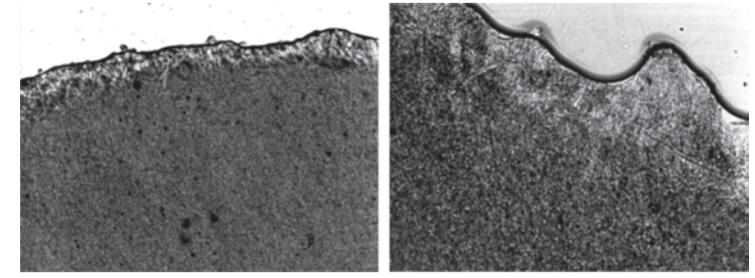
**Figure 15.** Optical micrographs of PLA. Initial Conditions. Left (10x), Right (40x).



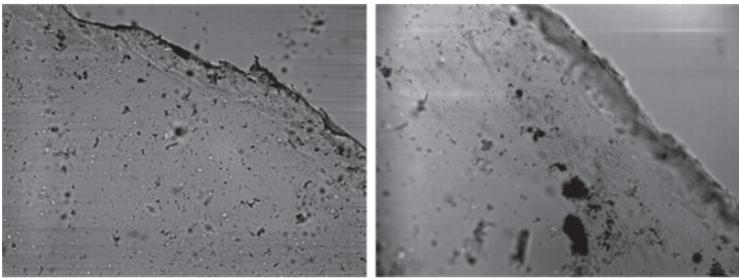
**Figure 19.** Optical micrographs. 75 days under anaerobic conditions. Left (10x), Right (40x).



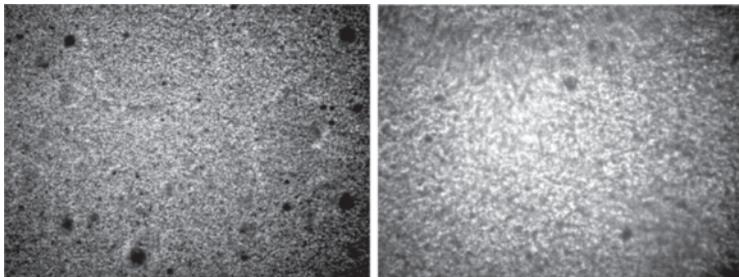
**Figure 16.** Optical micrographs PLA, 75 days under anaerobic conditions. Left (10x), Right (40x).



**Figure 20.** Optical micrographs. 210 days under anaerobic conditions. Left (10x), Right (40x).



**Figure 17.** Optical micrographs PLA, 210 days under anaerobic conditions. Left (10x), Right (40x).



**Figure 18.** Optical micrographs Oxo-HDPE. Initial Conditions. Left (10x), Right (40x).

#### 4. CONCLUSIONS

The analysis of the data gathered during the experimental phase gives, as a result, that there was no considerable loss of mass, low rate of biogas production and no apparent change in the mechanical properties of the materials. This conducts to a lack of evidence in supporting the occurrence of biological degradation for either of the polymeric substances under study.

Depletion of the mineral salts nitrate and sulfate (electron acceptors) implies respiratory processes by the biomass, evidencing biological activity. However, based upon the data gathered it is suspected that endogenous decay was the principal biological process involved. Additionally, the modulus of elasticity for both plastic materials tested remained practically constant, without variations that may indicate degradation.

As a general conclusion, it can be said that the materials under study when subjected to conditions similar to those encountered within a sanitary landfill will not show a biological degradation in short periods of time, i.e. six months. However, it is recommended for these materials' chemical and biological processes to be studied for longer periods to be considered and merchandised as truly "biodegradable".

## REFERENCES

- Aboud-Zeid, D., Müller, R., and Deckwer, W. (2001). Degradation of natural and synthetic polyesters under anaerobic conditions. *Journal of Biotechnology*, 86, 113-126.
- Agamuthu, P., and Faizura, N. (2005). Biodegradability of degradable plastic waste. *Waste Management Research*, 23, 95-100.
- ASTM D5526. (1994). *Standard test method for determining anaerobic biodegradation of plastic materials under accelerated landfill conditions*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D5511. (2002). *Standard test method for determining anaerobic biodegradation of plastic materials under high-solids anaerobic-digestion conditions*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D882 (2002). *Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, USA.
- Imam, S., Gordon, R., Shogren, T., Tosteson, N., Govind, N and Greene, R. (1999). Degradation of starch-poly(b-hydroxybutyrate-Co-b-hydroxyvalerate) bioplastic in Tropical Coastal Waters. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(1), 431-437.
- Itävaara, M., and Vikman, M. (1996). An overview of methods for biodegradability testing of biopolymers and packaging materials. *Journal of Environmental Polymer Degradation*, 4(1), 29-36.
- Itävaara, M., Karjomaa, S and Selin, J. (2002). Biodegradation of polylactide in aerobic and anaerobic thermophilic conditions. *Chemosphere*, 46, 879-885.
- Massardier-Nageotte, C., Pestre, T., Cruard-Pradet, T., and Bayard, R. (2006). Aerobic and anaerobic biodegradability of polymer films and physico-chemical characterization. *Polymer Degradation and stability*, 91, 620-627.
- Mohee, R., Unmar, A., Mudhoo, A., and Khadoo, P. (2008). Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials under aerobic and anaerobic conditions. *Waste Management*, 28, 1624-1629.
- Sha, A., Hasan, F., Hameed, A. and Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advance*, 26, 246-265.
- Serna, L., Rodríguez A., and Albán F. (2003). Ácido poliláctico (PLA): propiedades y aplicaciones. *Revista de Ingeniería y Competitividad*, Universidad del Valle, 5, 16-26.

# Preparación de pedidos eficiente en el centro de distribución utilizando VRP

## Picking efficient distribution center using a CVRP

RODRIGO ANDRÉS GÓMEZ MONTOYA<sup>1</sup>, ABDUL ZULUAGA MAZO<sup>2</sup>, LAURA VÉLEZ CALLE<sup>3</sup>

1. Profesor investigador de la Facultad de Ciencias Agrarias del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

2. Ingeniero industrial, MBA en Administración, profesor de tiempo completo del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

3. Ingeniera de sistemas e informática de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Investigadora del Grupo Modelamiento de la Gestión de Operaciones (Gimgo) de la Universidad Nacional, sede Medellín.

ragomez@elpoli.edu.co - azuluaga@elpoli.edu.co - lauravelez1@gmail.com

Recibido: 15/08/2012 Aceptado: 31/08/2012

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

El presente artículo se hizo con la idea de diseñar una estrategia de ruteo para la operación de preparación de pedidos utilizando la técnica VRP con teoría de grafos, buscando que ésta se desarrolle con un enfoque de eficiencia respecto al tiempo y la utilización de recursos. Para alcanzar el objetivo se cubren temas como centros de distribución (Cedi), preparación de pedidos, técnicas de modelamiento de ruteo como VRP y teoría de grafos. Como resultado del artículo, se obtiene una metodología de ruteo de preparación de pedidos eficiente que permitió reducir el tiempo en 12,5 minutos respecto a la estrategia actual, lo cual impacta en la eficiencia del Cedi.

**Palabras claves:** preparación de pedidos, centros de distribución (Cedi), ruteo, VRP (*Vehicle Routing Problem*) y teoría de grafos.

### Abstract

This article aims to design a routing strategy for picking operation using the VRP with graphs theory looking to develop this approach efficiency, respect to time and resource utilization. To achieve the objective, it covers topics such as Distribution Centers (Cedi), picking, routing modeling techniques as VRP and graphs theory. As a Result of the article, we got a method for efficiently picking routing which allowed reduce the time of picking in 12.5 minutes compared with the current strategy, which impacts the efficiency of the Cedi.

**Keywords:** Picking, DC (Distribution Center), routing, Graph Theory.

## INTRODUCCIÓN

La preparación de pedidos es una operación que puede clasificarse como crítica en la distribución (Cedi), ya que ésta permite recoger de las estanterías o zonas de almacenamiento los productos que se van a despachar, lo cual impacta en la satisfacción de los clientes y los costos de operación, que representan entre un 40 y 50% de los costos de operación del Cedi (Frazelle, 2001; Min, 2009).

De la exploración de la tecnología de punta y la experiencia de los investigadores se identifica la necesidad de diseñar estrategias de ruteo en la preparación de pedidos con modelamiento matemático basado en técnicas de investigación de operaciones como VRP (*Vehicle Routing Problem*), que permitan que la planeación y la ejecución de esta operación se realicen eficientemente respecto al tiempo de la operación, buscando mejorar la satisfacción del cliente y reducir los costos de operación, como se describió con anterioridad.

Por los motivos expuestos, se hizo el presente artículo con la idea de diseñar una estrategia de ruteo para la operación de preparación de pedidos utilizando la técnica VRP con teoría de grafos, que permita desarrollar un enfoque de eficiencia respecto al tiempo y la utilización de recursos. En relación con el público del artículo, son investigadores, profesionales, estudiantes y personas interesadas en la utilización de métodos de modelamiento matemáticos en el Cedi.

La metodología empleada para alcanzar el objetivo propuesto se basa en la revisión y el análisis de información secundaria obtenida de libros y artículos científicos relacionados con la preparación de pedidos, el VRP, la teoría de grafos y técnicas de ruteo en la operación del Cedi. Esto con el fin de desarrollar un caso de aplicación para la metodología de ruteo de la preparación de pedidos utilizando VRP y la teoría de grafos, lo cual requiere la recolección y el análisis de información primaria de la operación.

El artículo se estructura en cuatro partes. En la primera, se hace una contextualización teórica de la preparación de pedidos y la relación con técnicas de modelamiento de ruteo como el VRP. En la segunda, se presenta la metodología de ruteo eficiente de la preparación de pedidos para Cedi. En la tercera, se muestra el desarrollo de la aplicación empresarial con la metodología de preparación de pedidos en una empresa mediana de colchones ubicada en la ciudad de Medellín.

Finalmente, se sacan las conclusiones y se propone un trabajo futuro.

## CONTEXTUALIZACIÓN TEÓRICA Y EXPLORACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PUNTA

La preparación de pedidos es una operación del Cedi que tiene como objetivo recoger los productos ubicados en las estanterías o zonas de almacenamiento que permitan atender los requerimientos de los clientes en las condiciones pactadas respecto a referencia, cantidad y calidad (Chan & Chan, 2011). Por su parte, Mauleón (2003) define preparación de pedido como “La actividad que desarrolla un equipo de personas para preparar los pedidos de los clientes, que incluye un conjunto de actividades destinadas a extraer y acondicionar los productos demandados en las condiciones establecidas (tipo de empaque, marcado especial, cantidades, etc.)”.

Para apoyar la planeación, ejecución y control de las operaciones de preparación de pedidos pueden emplearse diferentes recursos, como personas con competencias, infraestructura, equipo de manejo de materiales (montacargas, transpaleta, bandas transportadoras) y tecnologías de la información y comunicaciones (TIC) como el WMS (*Warehouse Management System*), *Pick to Light* y *Pick to Voice* (Correa, Gómez & Cano, 2009).

Su importancia radica en que aproximadamente entre el 40 y 50% del costo total de las operaciones del Cedi, dependiendo de una serie de factores como actividades de preparación de equipo de manejo de materiales, los recorridos, la extracción, la inspección de los productos recogidos y el acondicionamiento previo al empaque (Mauleón, 2003).

Para diseñar o mejorar la operación de preparación de pedidos pueden utilizarse herramientas cualitativas y cuantitativas. Entre las cualitativas se utilizan recomendaciones de expertos o resultados de grupos de enfoque. Ahora, respecto a las herramientas cuantitativas, se consideran la simulación discreta, los heurísticos, metaheurísticos, teoría de grafos, entre otras herramientas que apoyan decisiones referentes a políticas, actividades y recursos, buscando que la operación se desarrolle de manera eficiente y orientada a la satisfacción de las necesidades de los clientes.

Para identificar las herramientas cuantitativas utilizadas en la preparación de pedidos se explora la tecnología de punta existente, basada en la revisión y el análisis de

bases de datos como Science Direct, Emerald, Taylor and Francis, Google Scholar. Entre los resultados se obtienen los siguientes enfoques:

- a) Pan & Shih (2008) diseñan un modelo para la evaluación del desempeño de un sistema de preparación de pedidos con congestión, utilizando simulación discreta, considerando como medidas de eficiencia el tiempo o la distancia de las rutas para recoger los productos.
- b) Parikh & Meller (2008) desarrollan un modelo basado en la técnica de investigación de operaciones *Bin Packing Problem* (BPP) para seleccionar las estrategias de preparación de pedidos en el Cedi por lote o zona basados, buscando reducir la cantidad de preparados de pedidos asignados por rutas en la operación.
- c) Ho, Su & Shi (2008) elaboran un método basado en la preparación de pedidos por lotes para Cedi con dos pasillos cruzados. Dentro del método, los autores basan las estrategias de ruteo de preparación de pedidos en dos métodos que buscan minimizar la distancia. El primero se denomina *Largest GAP*, y el segundo utiliza el metaheurístico de recocido simulado.
- d) Theys, Bräysy, Dullaert & Raa (2010) emplean el método TSP (*Travelling Salesman Problem*) como estrategia de ruteo en el *preparación de pedidos* en la gestión de almacenes o Cedi con múltiples pasillos paralelos. Con este enfoque de TSP y heurísticos los autores indican que se puede reducir la distancia recorrida en la preparación de pedidos en un 47%.
- e) Klaus (2011) desarrolla un heurístico de ruteo para la secuenciación por lotes en la preparación de pedidos de un Cedi integrado con un sistema de administración de almacenes WMS. La estrategia de ruteo pretende minimizar el tiempo de preparación de pedidos buscando aumentar la eficiencia del Cedi.
- f) Chan & Chan (2011) diseñan un modelo para mejorar la productividad de la operación de preparación de pedidos de un sistema manual con estantería de varios niveles a través de la implementación de una estrategia de almacenamiento basada en clases y la utilización de la simulación discreta para evaluar diferentes rutas, con el fin de conseguir aquella que permita obtener el menor tiempo de operación.
- g) Hsieh & Huang (2011) emplean heurísticos y diseño de experimentos para reducir la distancia y aumentar

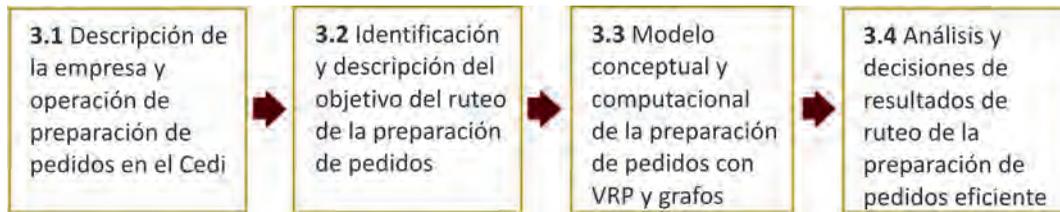
la utilización de equipos de manejo de materiales en la operación de preparación de pedidos mediante un modelo de optimización de las rutas.

Otro enfoque que puede adaptarse en el ruteo de preparación de pedidos es el método VRP (*Vehicle Routing Problem*), que permite diseñar estrategias de ruteo que minimicen el tiempo de la operación y la adecuada utilización de los equipos de manejo de materiales (Bae, Hwang, Cho & Goan, 2007). En la exploración de la tecnología de punta, se identificaron dos propuestas científicas que pueden adaptarse al ruteo de la preparación de pedidos: a) Peyer, Rautenbach & Vygen (2009) utilizan una estrategia de ruteo que se basa en el cálculo de la ruta de distancia mínima que forma parte del conjunto de herramientas de la teoría de grafos que permite resolver el problema de ruteo de vehículos, y b) Duhamel, Lacomme, Quilliot & Toussaint desarrollan una propuesta basada en un algoritmo evolutivo de búsqueda local para el problema de ruteo, considerando capacidad de carga de los medios de transporte, lo cual permite desarrollar un VRPC (*Vehicle Routing Problem Capacited*).

De la exploración, revisión y análisis de algunos artículos de la tecnología de punta de la preparación de pedidos en el Cedi, se puede indicar que existen diferentes enfoques que cubren el uso de reglas y heurísticos que buscan reducir la distancia o el tiempo de la operación. También se identifica la posibilidad de adaptar la técnica VRP de ruteo de vehículos de transporte a la preparación de pedidos, ya que ésta permite minimizar el tiempo de la operación, y considera la utilización de la capacidad de los equipos de manejo de materiales (transpaleta, montacargas), que puede considerarse una restricción en esta operación.

Otra oportunidad de investigación que se identifica es la adaptación del VRP con teoría de grafos como herramienta para minimizar el tiempo y aumentar la utilización de la capacidad de los equipos de manejo de materiales en la preparación de pedidos. Con esto se puede aumentar la eficiencia, que es un criterio que se pretende desarrollar con el presente artículo.

Debe resaltarse que la teoría de grafos es una técnica informática que permite resolver problemas combinatoriales a través de la representación de nodos (posiciones de almacenamiento en las estanterías) y arcos (distancia o tiempos entre las posiciones), los cuales permiten rea-



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 1.** Metodología de preparación de pedidos eficiente VRP con grafos.

lizar la preparación de pedidos en el Cedi (Berge, 2001). Adicionalmente, los grafos pueden utilizar diversos métodos, como el algoritmo de Floyd-Warshall (todos los caminos mínimos), algoritmo de Kruskal (árbol de costo total mínimo), algoritmo de Prim (árbol de costo total mínimo), caminos mínimos con el método Dijkstra (Tutte, 2001).

Con el desarrollo del enfoque VRP con teoría de grafos, se busca aportar al desarrollo de la agenda de investigación del ruteo en la preparación de pedidos con alternativas de modelamiento que permitan que esta operación se desarrolle de manera eficiente respecto a la reducción de tiempo, distancia y aumento de la utilización de los equipos de manejo de materiales.

## METODOLOGÍA

La metodología de diseño de la operación de preparación de pedidos usando VRP con teoría de grafos se soporta en cuatro etapas (figura 1).

### Descripción de la empresa y operación de la preparación de pedidos en el Cedi

En esta etapa se describen las generalidades de la empresa, los procesos logísticos y el Cedi, con el fin de contextualizar el entorno en que se desarrolló la preparación de pedidos.

Se hace una descripción general de la preparación de pedidos planteando su objetivo, para contextualizar su impacto estratégico y operativo en el Cedi. Los detalles relacionados con las políticas, actividades y recursos de la preparación de pedidos se presentan en la ficha de caracterización que se desarrolla en la etapa de modelamiento conceptual.

### Identificación y descripción del objetivo del ruteo de la preparación de pedidos

Se define el objetivo del modelamiento de la preparación de pedidos que puede relacionarse con el diseño o mejoramiento de las políticas, actividades o recursos, con el propósito de que éstos se realicen de manera eficiente (Klaus, 2011). Esta etapa es considerada clave dentro de la metodología, ya que permite establecer el enfoque del modelamiento.

### Modelo conceptual y computacional de la preparación de pedidos con VRP y grafos

En esta etapa se elabora el modelo conceptual de la preparación de pedidos, que consiste en caracterizar su flujo de productos e información, incluyendo la descripción de las actividades y recursos asociados. Adicionalmente, se establecen las variables de entrada (tipo de estrategia de recogida, tiempo entre posiciones de almacenamiento, cantidad de operarios y equipo de manejo de materiales), variable de respuesta, función objetivo y restricciones necesarios que permitan medir el tiempo, distancia y eficiencia de esta operación (Bae, Hwang, Cho & Goan, 2007) (Peyer, Rautenbach & Vygen, 2009). Más adelante se presenta la ficha de apoyo para el modelo conceptual (tabla 1).

El modelamiento computacional consiste en traducir el modelo conceptual en el lenguaje del *software* Grafos®, que incluye el enfoque VRP con grafos, el cual permite realizar la adaptación para el ruteo de la operación de preparación de pedidos con un enfoque de eficiencia. Debe destacarse que en el modelamiento computacional se establecen los criterios de corridas y de parada de la ruta.

**Tabla 1**  
Formato de modelamiento conceptual de la operación de preparación de pedidos

Nombre de la operación		Objetivo		
Responsable				
Entrada	Actividad	Salida	Cliente	
<b>Recursos</b>				
Personal				
Equipo manejo de materiales				
Infraestructura				
Tecnologías de información y comunicaciones				
Variables de entrada		Variables de salida		

### Análisis de resultados de ruteo de la preparación de pedidos eficiente

Se hace un análisis de la operación de preparación de pedidos, que consiste en revisar y estudiar el tiempo promedio de la ruta, secuencia o posiciones de almacenamiento que hay que visitar para recoger los productos, distancia recorrida, utilización de los equipos de manejo de materiales empleados en la operación (Klaus, 2011).

Se realiza una medición de la eficiencia de la ruta de preparación de pedidos, que consiste en evaluar principalmente dos indicadores relacionados con tiempo y utilización de equipo de manejo de materiales (montacargas)

$$\% \text{ de tiempo de ruteo} =$$

$$\frac{\text{tiempo de ruteo ejecutado de la preparación de pedidos}}{\text{tiempo de ruteo planificado de la preparación de pedidos}}$$

$$\% \text{ de utilización de equipos} =$$

$$\frac{\text{capacidad utilizada en la preparación de pedidos}}{\text{capacidad disponible de la preparación de pedidos}}$$

En el análisis cobra interés comparar los resultados obtenidos del ruteo de la preparación de pedidos con los objetivos de diseño o mejoramiento de la operación estándar de desempeño histórico, u otras metas que permitan determinar que se están cumpliendo objetivos de operación y eficiencia

En esta etapa, el analista o investigador, de manera opcional, puede efectuar un estudio del impacto económico en la reducción de costos, en el retorno de la

inversión a través de indicadores como VPN (valor presente neto), TIR (tasa interna de retorno) y ROI (*Return On Investment*).

Finalmente, a partir del análisis se establecen las conclusiones acerca del ruteo de la preparación de pedidos modelado con VRP con grafos, y se establecen decisiones de diseño o mejoramiento de las políticas, operaciones y recursos de esta operación que permitan que ésta cumpla los objetivos y opere eficientemente. Las conclusiones y decisiones pueden presentarse a través de informes o el desarrollo de la caracterización de la operación.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología de ruteo eficiente para la operación de preparación de pedidos se implementa como investigación aplicada en una empresa dedicada a la fabricación y comercialización de colchones, ubicada en la ciudad de Medellín. A continuación, se implementan las cinco etapas de la metodología descrita.

#### Descripción de la empresa y operación de la preparación de pedidos

La empresa en estudio, localizada en la ciudad de Medellín, se dedica a la fabricación y comercialización de colchones que permiten atender los requerimientos de los clientes locales y nacionales. La compañía produce mensualmente 3000 colchones de 15 referencias de productos.

El Cedi de la empresa permite almacenar productos que provienen de producción y facilitar la atención de

los pedidos de los clientes. Entre las operaciones desarrolladas en el Cedi se encuentran la recepción, acomodo en las posiciones de almacenamiento, preparación de pedidos y despacho de los colchones solicitados en los pedidos. Adicionalmente, debe indicarse que el Cedi tiene cerca de 1000 m<sup>2</sup>, con una capacidad de almacenamiento en un sistema de estanterías de 520 colchones.

La preparación de pedidos en el Cedi en estudio tiene como objetivo recoger de las posiciones de almacenamiento los colchones que conforman los pedidos de los clientes. La preparación de pedidos a nivel estratégico impacta en la satisfacción de las necesidades de los clientes respecto a cantidad y referencias de colchones, y contribuye al cumplimiento del tiempo de entrega. A nivel operativo, esta preparación afecta la eficiencia de las operaciones del Cedi respecto a la utilización de recursos y costos de operación.

### Identificación y descripción del objetivo del ruteo de la preparación de pedidos

La compañía tiene como objetivo aumentar la eficiencia de la preparación de pedidos a través de la reducción del tiempo de ruteo y el incremento de la utilización del equipo de manejo de materiales, transpaleta, buscando mejorar la satisfacción de los clientes y el desempeño del Cedi, que es crítico en el sistema logístico de la empresa de colchones.

Por los motivos expuestos, el objetivo de la investigación aplicada se enfocaba en el diseño de una estrategia de ruteo de la preparación de pedidos empleando las técnicas de modelamiento VRP con teoría de grafos que permitan realizar esta operación en el mínimo tiempo, garantizando un adecuado y eficiente uso de los equipos de manejo de materiales.

### Modelo conceptual y computacional del ruteo de la preparación de pedidos en el Cedi empresa de colchones

A continuación se presenta el modelo conceptual de la preparación de pedidos para la empresa de colchones, basándose en la caracterización de las actividades y recursos (tabla 2). Adicionalmente, se presentan las variables de entrada y salida que utilizan en el modelamiento del ruteo de la preparación de pedidos con VRP y con teoría de grafos.

### Función objetivo

El objetivo es diseñar una ruta para realizar la preparación de pedidos en el Cedi de la empresa de colchones que minimice el tiempo de la operación y utilice adecuadamente la capacidad de las transpaletas, permitiendo lograr un enfoque de eficiencia.

El planteamiento de la función objetivo se basa en la utilización del método VRP con teoría de grafos, que presenta la siguiente formulación matemática:

$$\min \sum_{e \in E} c_e x_e \quad (3)$$

Para una arista  $e = [i, j]$  denotamos por  $c_e$  el costo o tiempo de ir de la posición de almacenamiento  $i$  a  $j$  y a  $x_e$  como una variable binaria que indica si la arista  $e$  está en la ruta del *preparación de pedidos* en el Cedi. También existe una flota con  $K$  equipos de manejo de materiales o transpaleta, cada uno de capacidad  $Q$ .

### Restricciones

Para la operación de preparación de pedidos en el Cedi de la empresa de colchones, se proponen las siguientes restricciones que garantizan la validez del modelo de ruteo:

$$x(\delta(\{i\})) = 2 \text{ para todo } i \in V / \{0\} \quad (4)$$

$$x(\delta(s)) \geq \frac{2}{Q} \sum_{i \in S} d_i \text{ para todo } S \subset V / \{0\} \quad (5)$$

$$x_e \in \{0, 1\} = 2 \text{ para todo } e \in E \quad (6)$$

La igualdad de la restricción (4) establece que el grado de cada vértice correspondiente a cada posición de almacenamiento es exactamente 2, lo que permite que en cada ruta de preparación de pedidos se visite una sola vez con la transpaleta. Las desigualdades (5) y (6) garantizan la biconexidad de una solución entera y que un conjunto de posiciones de almacenamiento, donde se encuentran los productos que hay que recoger, que supera la capacidad máxima  $Q$  de la transpaleta, no puede ser visitado.

**Tabla 2**  
Caracterización de operación del Cedi

Nombre de la operación		Picking	Responsable	Coordinador del Cedi	
Objetivo		Preparar los pedidos de los clientes en el menor tiempo posible y en las condiciones pactadas con los clientes respecto a referencia y cantidad de los colchones.			
Estrategia de preparación de pedidos		Preparación de pedidos por olas o utilización de lista de preparación de pedidos			
Proveedor	Entrada	Actividad		Salida	Cliente
Cliente y proceso de procesamiento de pedidos	Lista consolidada con pedidos o picking list con referencia y cantidad de colchones.	1. Elaborar lista de preparación de pedidos, incluyendo asignación de personal y equipos.		Pedido recogido y ubicado en el proceso de despacho	Operación de despacho
		2. Diseñar el ruteo de la preparación de pedidos definiendo la secuencia de las posiciones de almacenamiento que hay que visitar			
		3. Recoger los colchones de las posiciones de almacenamiento según referencia y cantidad especificados en la lista de preparación de pedidos.			
		4. Trasladar los colchones al proceso de despacho.			
		5. Verificar que los colchones correspondan en referencia y cantidad.			
Recursos					
Personal		Tres operarios.			
Equipo manejo de materiales		Dos transpaletas con capacidad para diez colchones cada una			
Infraestructura		Estanterías con posiciones de almacenamiento y área de despacho.			
Tecnologías de Información y comunicaciones		WMS (Warehouse Management System) con código de barras y radiofrecuencia, que permite captar datos, identificar los productos y gestionar información de las operaciones del Cedi.			
Variables de entrada			Variables de salida		
Cantidad de productos en lista de preparación de pedidos.			Tiempo de ruta de la preparación de pedidos en minutos. % de utilización de equipo y personal en la preparación de pedidos.		
Cantidad de transpaletas disponibles.					
Posiciones de almacenamiento en que se ubican los colchones que hay que recoger.					
Cantidad de clientes que hay que atender con el pedido que se debe preparar.					

Fuente: elaboración propia.

El cumplimiento de las restricciones descritas garantiza la validez de la ruta de preparación de pedidos no sólo en la cantidad de colchones que hay que recoger sino en la capacidad de las transpaletas.

### Modelo computacional de ruteo de la preparación de pedidos VRP con grafos

Para elaborar el modelo computacional de ruteo de la preparación de pedidos con VRP se utiliza el *software Grafos*<sup>®</sup>, desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) en el lenguaje Java<sup>®</sup> (Rodríguez, 2011). El modelamiento incluye la presentación de la lista de preparación de pedidos, matriz de tiempos entre posiciones de almacenamiento con su respectiva

generación de nodos, y establecimiento de capacidad de las transpaletas.

- **Lista de preparación de pedidos**

Se presenta un lista de preparación de pedidos que describe las referencias de colchones y las cantidades típicas que se deben preparar en el Cedi para atender los pedidos de los clientes tipo distribuidores de la empresa en estudio en un día de trabajo. La lista de preparación de pedidos incluye las posiciones de almacenamiento donde se ubican los colchones que forman parte de la ruta de la preparación de pedidos y la asignación de las cantidades en los grafos (tabla 3 y figura 2).



Fuente: elaboración propia, Grafos®.

**Figura 2.** Asignación del picking list con Grafos®.

**Tabla 3**

Lista de preparación de pedidos en el Cedi de colchones

Referencia del colchón	Cantidad	Posición de almacenamiento
Ref. 1 Jacard 140*190 cm	20	1
Ref. 4 Pillow 120*190 cm	18	3
Ref. 2 Jacard 120*190 cm	30	4
Ref. 3 Pillow 140*190 cm	15	8
Ref. 5 Premium 160*190 cm	5	9

Fuente: elaboración propia.

Origen/Destino	Pos 0	Pos 1	Pos 3	Pos 4	Pos 8	Pos 9
Pos 0		1	3	4	6	7
Pos 1			3	5	7.5	9
Pos 3	3	3.5		1	4	5.5
Pos 4	4	5	1		3	4.5
Pos 8	6	7.5	4	3		1.5
Pos 9	7	9	5.5	4.5	1.5	

Fuente: elaboración propia, Grafos®.

**Figura 3.** Matriz de tiempos entre posiciones de almacenamiento en minutos.

• **Matriz de tiempos entre posiciones de almacenamiento**

Las referencias de colchones se ubican en cinco posiciones de almacenamiento distribuidas en diferentes pasillos del Cedi. A continuación, se presenta una matriz con los tiempos en minutos entre las posiciones de almacenamiento que se deben visitar en la secuencia de la ruta de preparación de pedidos (figura 3).

• **Establecimiento de capacidad de carga de transpaleta**

Se establece la capacidad de carga de cada una de las dos transpaletas asignadas para la preparación de pedidos que corresponde a 200 colchones por cada turno

de trabajo de 600 minutos o 10 horas en el Cedi, que equivale a un turno de trabajo (figura 4).

En el modelamiento se asigna un costo fijo de \$30.000 día en un turno de trabajo en el Cedi para cada transpaleta, incluyendo el salario del operario de preparación de pedidos. Respecto al costo variable se establece un valor de \$300 por acondicionamiento, mantenimiento y depreciación de cada una de las transpaletas.

• **Análisis de resultados del ruteo de preparación de pedidos**

Para obtener la ruta de la preparación de pedidos en el Cedi de la empresa de colchones, se utiliza el método



Fuente: elaboración propia, Grafos®.

**Figura 4.** Asignación de las transpaletas a la operación de preparación de pedidos..

CVRP (*Capacited Vehicle Routing Problem*) de Grafos®, que permite diseñar la ruta con el menor tiempo para recoger los productos de la lista de preparación de pedidos. Más adelante se presentan los resultados de la ruta obtenidos con Grafos® (figura 5).

```

RUTA 1 :: IdVehiculo 1: Transpaleta 1
Distancia = 2
(1) > Fos 0, Fos 1
(1) > Fos 1, Fos 0

Servicio/Capacidad = Aprovechamiento (%): 20/200 = 10 %
(Demanda) Cliente > Ubicación:
(20) Fos 1 > Fos 1

RUTA 2 :: IdVehiculo 2: Transpaleta2
Distancia = 15,5
(3) > Fos 0, Fos 3
(1) > Fos 3, Fos 4
(3) > Fos 4, Fos 8
(1,5) > Fos 8, Fos 9
(7) > Fos 9, Fos 0

Servicio/Capacidad = Aprovechamiento (%): 68/200 = 34 %
(Demanda) Cliente > Ubicación:
(18) Fos 3 > Fos 3
(30) Fos 4 > Fos 4
(15) Fos 8 > Fos 8
(5) Fos 9 > Fos 3

Distancia total = 17,5 unidades
    
```

Fuente: elaboración propia, Grafos®.

**Figura 5.** Resultados de ruteo de preparación de pedidos en el Cedi de la empresa de colchones.

De los resultados del CVRP con Grafos® se obtienen dos subrutas para recoger los colchones de la lista de preparación de pedidos en el menor tiempo posible. La primera subruta emplea un tiempo de dos minutos, se asigna la transpaleta 1, y se establece como secuencia iniciar en la posición 0 y visitar la posición de almacenamiento 1, donde se recogen 20 colchones de la referencia 1 Jacard 140\*190 cm. En la segunda subruta se obtiene un tiempo de 15,5 minutos, se asigna la transpaleta 2, la secuencia de recogida de los colchones en la preparación de pedidos inicia en la posición 0 y se visitan en las posiciones de almacenamiento 3, 4, 8 y 9 para recoger, respectivamente, las cantidades de colchones de la referencia 4 Pillow 120\*190 cm, referencia 2 Jacard 120\*190 cm, referencia 3 Pillow 140\*190 cm y referencia 5 Premium 160\*190 cm.

El tiempo total de ruteo de la preparación de pedidos para completar la recogida de las referencias de los colchones establecidos en la lista de preparación

de pedidos es de 17,5 minutos, el cual se obtiene de la suma de las subrutas 1 y 2, descritas con anterioridad.

Otro aspecto importante en el análisis del ruteo de la preparación de pedidos es el uso de la capacidad de las transpaletas 1 y 2, ya que del total de la capacidad disponible en el turno de trabajo, la transpaleta 1 utiliza un 10% o 20 colchones, y la transpaleta 2 usa un 34% o 68 colchones. Esta información es fundamental para la planificación de las diferentes listas de preparación de pedidos que permitan atender los pedidos de los clientes.

Finalmente, se presenta la evaluación de los indicadores de eficiencia de la preparación de pedidos en el Cedi, que es uno de los componentes principales de la metodología que se desarrolla en el artículo y que se muestra a continuación.

La eficiencia en el tiempo de ruteo de la preparación de pedidos se obtiene así:

$$\begin{aligned}
 \% \text{ de tiempo de ruteo} &= \frac{\text{tiempo de ruteo ejecutado de la preparación de pedidos}}{\text{tiempo de ruteo planificado de la preparación de pedidos}} \\
 &= \frac{17,5 \text{ min}}{20 \text{ min}} = 87,5\%
 \end{aligned}$$

Del primer indicador de eficiencia se puede señalar que con la estrategia de VRP con Grafos® para el ruteo de la preparación de pedidos se puede realizar la operación en menos tiempo (87,5%) que con la estrategia actual que utiliza la empresa, que consiste en diseñar la ruta comenzando de la posición más lejana a la más cercana donde se realiza la consolidación de los pedidos. Es decir, se reduce el tiempo para hacer la ruta en 12,5%, equivalente a 2,5 minutos.

Por otra parte, debe indicarse que en promedio la empresa planifica y ejecuta cinco listas de preparación de pedidos por turno de trabajo en el Cedi, lo cual permite proyectar un ahorro del tiempo de operación de 12,5 minutos.

La eficiencia en la utilización de equipos se obtiene así:

$$\begin{aligned}
 \% \text{ de utilización de equipos} &= \frac{\text{capacidad utilizada en la preparación de pedidos}}{\text{capacidad disponible de la preparación de pedidos}} \\
 &= \frac{88 \text{ colchones}}{88 \text{ colchones}} = 100\%
 \end{aligned}$$

Con la estrategia de ruteo con VRP y con grafos, se obtiene la misma eficiencia en el uso de las transpaletas. Esto puede considerarse como un resultado adecuado, teniendo en cuenta que lo importante en la operación es la reducción en el tiempo de ruteo de la preparación de pedidos, como se describió en el indicador anterior.

## CONCLUSIONES

La preparación de pedidos es una operación del Cedi que impacta en los costos, la satisfacción y la atención de los pedidos de los clientes. De ahí la importancia de su adecuada gestión, diseño y mejoramiento a través del uso de técnicas cualitativas y cuantitativas, entre las cuales se consideran la simulación y los metaheurísticos, entre otros.

Del artículo se obtiene como resultado una metodología que permite calcular rutas eficientes de preparación de pedidos basado en el método de VRP con grafos, lo que permite recoger los productos planificados en la lista de preparación de pedidos en el menor tiempo posible. La metodología contribuye al desarrollo de la agenda de investigación del tema, ya que a partir de una exploración a la tecnología de punta no se identificaron propuestas que utilizaran VRP con grafos en el modelamiento del ruteo de la preparación de pedidos.

De la aplicación de la metodología de ruteo de la preparación de pedidos basado en VRP con grafos en el Cedi de una empresa mediana, que fabrica y comercializa colchones, se obtiene un enfoque de investigación aplicada, ya que se reduce el tiempo del *preparación de pedidos* en un 12,5% o 2,5 minutos por lista de preparación de pedidos. Esto impacta potencialmente en la agilidad de la atención de los pedidos de los clientes y los costos de operación, y se refleja en la eficiencia del Cedi. Debe señalarse que, en promedio, la empresa planifica y ejecuta cinco listas de preparación de pedidos por día para atender las solicitudes de los clientes, por lo cual, se pueden disminuir los tiempos de operación de la preparación de pedidos en 12,5 minutos por turno de trabajo del Cedi. De esta manera, se demuestran la importancia y la aplicabilidad de técnicas de modela-

miento en la gestión de la eficiencia en el Cedi en el ámbito empresarial.

Finalmente, como trabajo futuro se propone mejorar la capacidad de la técnica de modelamiento VRP con grafos, complementándola con el uso de diseño de experimentos y metaheurísticos que permitan optimizar la eficiencia de la preparación de pedidos y mejorar la satisfacción de las necesidades de los clientes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bae, S.-T., Hwang, H. S., Cho, G.-S. & Goan, M.-J. (2007). Integrated GA-VRP solver for multi-depot system. *Computers & Industrial Engineering*, 53(2), 233-240.
- Berge, C. (2001). *The theory of graphs*. Courier Dover Publications.
- Chan, F. T. S. & Chan, H. K. (2011). Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of class-based storage. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 2686-2700.
- Correa, A., Gómez, R. & Cano, A. (2009). Gestión de Almacenes y Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC). *Estudios Gerenciales*, 26, 147 - 173.
- Duhamel, C., Lacomme, P., Quilliot, A. & Toussaint, H. (2011). A multi-start evolutionary local search for the two-dimensional loading capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 38(3), 617-640.
- Ho, Y.-C., Su, T.-S. & Shi, Z.-B. (2008). Order-batching methods for an order-picking warehouse with two cross aisles. *Computers & Industrial Engineering*, 55(2), 321-347.
- Hsieh, L.-F. & Huang, Y.-C. (2011). New batch construction heuristics to optimise the performance of order picking systems. *International Journal of Production Economics*, 131(2), 618-630.
- Klaus, M. (2011). Increasing warehouse order picking performance by sequence optimization. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 20(0), 177-185.
- Mauleón, M. (2003). *Sistemas de almacenaje y picking*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Pan, J. C.-H. & Shih, P.-H. (2008). Evaluation of the throughput of a multiple-picker order picking system with congestion consideration. *Computers & Industrial Engineering*, 55(2).
- Parikh, P. J. & Meller, R. D. (2008). Selecting between batch and zone order picking strategies in a distribution center. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5), 696-719.
- Peyer, S., Rautenbach, D. & Vygen, J. (2009). A generalization of Dijkstra's shortest path algorithm with applications to VLSI routing. *Journal of Discrete Algorithms*, 7(4), 377-390.
- Rodríguez, A. (2011). *Software para la construcción, edición y análisis de grafos*. Consultado el 10 de septiembre de 2011 en <http://personales.upv.es/aroDRIGU/grafos>.
- Theys, C., Bräysy, O., Dullaert, W. & Raa, B. (2010). Using a TSP heuristic for routing order pickers in warehouses. *European Journal of Operational Research*, 200(3), 755-763.
- Tutte, W. T. (2001). *Graph theory*. Cambridge University Press.

# Especial 40 años

Escuela Colombiana de Ingeniería  
1972-2012

Entrevistas Cristina Salazar Perdomo

Con motivo de los actos conmemorativos de los cuarenta años de la fundación de la Escuela Colombiana de Ingeniería, la Revista habló con algunos de sus fundadores para conocer aspectos de esa fecha memorable y compartir con los lectores lo que sienten y piensan acerca del futuro de la institución.

## LUIS GUILLERMO AYCARDI BARRERO

**La pregunta obligada para empezar: ¿qué recuerda usted de ese 20 de octubre en que se fundó la Escuela?**

Fue muy emocionante, porque estábamos pensando en fundar una escuela de ingeniería desde mucho tiempo atrás. Incluso hubo declaraciones en el mismo sentido por parte de otras personas, pero no tuvieron eco. En esa época hubo huelgas continuas, interrupción de clases y manifestaciones en la Universidad Nacional, por lo que surgió la idea. Sus principales impulsores fueron Alejandro Sandino y Ernesto Obregón. Yo era muy cercano a ambos.

Cuando comenzamos con este proyecto nos dimos cuenta de que necesitábamos patrocinio, pero era algo difícil de conseguir. Fueron muchos contratiempos los que nos causaron tristeza al ver que no había resultados. Entonces el hecho de poder firmar, porque teníamos patrocinadores, nos llenaba de emoción. Había una felicidad inmensa.

**Ustedes tenían ganas, experiencia, pero platica... nada. ¿No se sorprende de que hubieran cristalizado esa idea?**

Sí, es verdad. Éramos jóvenes, pero tampoco teníamos unas ambiciones muy grandes. Fíjese que el mismo nombre expresaba el deseo de seguir estudiando ingeniería. Ni siquiera se pensó en que podría haber otras carreras. Casi era sólo ingeniería civil. De pronto teníamos presente la posibilidad de crear otras especialidades, pero en esa área, porque todos éramos ingenieros civiles.

Precisamente por eso que usted anota, ¿cómo podría sintetizar la evolución de la Escuela si sólo se pensaba en tener un programa de Ingeniería Civil y 40 años después hay muchos más, tanto en pregrado como posgrado, y su proyección es mayor?

Hubo un tiempo en el cual se dijo claramente que la Escuela era el mejor sitio para estudiar ingeniería civil. Luego se demostró que era necesario tener otras carreras y eso ha sido fantástico. Miremos cómo comenzó, con una sede alquilada en Usaquén, y luego, gracias a la intervención del doctor Luis Carlos Sarmiento, conseguimos un lote en el que podíamos construir. Logramos pagar a crédito un gran terreno en el que todavía hay mucho espacio para construir.



Luis Guillermo Aycardi Barrero



Jorge Eduardo Estrada Villegas

**Pese a todos los logros de la Escuela, ¿piensa que todavía hay algo que no se ha conseguido?**

Primero que todo, creo que es buena la declaratoria de universidad. En cuanto a su pregunta, pienso que debe haber una mayor participación en investigación aplicada. Es clave impulsarla muy pronto.

**¿Cuál cree que es el sello de los profesores, estudiantes y graduados de la Escuela?**

Pienso que los caracterizan sus principios éticos, su seriedad, el afán por el estudio y por la calidad e, insisto, un ejercicio profesional recto. Debemos hacer énfasis en que así debe ser, porque se están viendo muchas intervenciones irregulares en la ingeniería... El comportamiento de los ingenieros es cada vez más discutible.

**¿Qué sentimiento le inspira el aniversario de una obra tan importante como la Escuela?**

Una enorme satisfacción, pese a que mi participación no ha sido tan grande, porque ha habido gente que se ha dedicado a la Escuela de tiempo completo y yo nada más fui profesor durante un tiempo, además de que he ocupado cargos en el consejo directivo. Aun así, me siento totalmente de la Escuela.

**¿Cuál será su compromiso con la Escuela en los próximos años? Además de lo que le ha aportado, ¿qué más quisiera darle?**

Quisiera estar más vinculado a programas de investigación aplicada, en ingeniería civil, que es mi especialidad. El país lo necesita y pienso que las universidades se han descuidado en ese aspecto.

También me encantaría hacer mucha investigación conjunta e intercambio de profesores con universidades del exterior. Lo que más me llena de satisfacción es que a los pocos años de haber fundado la Escuela, realizamos una investigación conjunta con la Universidad de Lehigh, de Estados Unidos; una parte se hacía aquí y otra allá; además, se editó una publicación que tuvo un éxito impresionante. Después se organizó un congreso nacional de edificios y trajimos al presidente de la comisión de ingenieros de edificios de gran altura como conferencista. ¡Y estábamos empezando! Hoy en día eso nos está haciendo falta.

## **ARMANDO PALOMINO INFANTE**

**¿Cómo sintetizaría estos 40 años de la Escuela?**

Ha sido una experiencia muy interesante para nosotros, los fundadores, por haber sido todos profesores de la Universidad Nacional, nuestra madre nutricia. Considero que si nuestros padres nos dieron su sangre y su formación elemental, llena de afecto, la universidad nos hizo hombres y nos hizo personas. Si llegamos a tener alguna importancia, será gracias a la Universidad Nacional. Lamentablemente, por circunstancias políticas de la época, en los años 1971 y 1972 nos vimos obligados a emigrar poco a poco. Yo fui el primero. Cuando era director de Ingeniería Civil, un buen día aparecieron unos avisos

en las paredes blancas de la universidad donde decía “Palomino y Barona son agentes de la CIA”. Para las personas de izquierda éramos un obstáculo y por esa razón me tocó salir. Fue entonces cuando los mayores del grupo, porque yo era el chiquito del paseo, dijeron: “Hay que buscar la forma de que nuestra experiencia no se pierda”. Y surgió la idea de los diez que convocó el doctor Sandino. Así nació la Escuela.

**Ustedes crearon una institución sin grandes pretensiones, con inmensos propósitos en calidad pero muy centrada en ingeniería, sobre todo en ingeniería civil. ¿Qué opinión le merece esto frente a lo que es la Escuela hoy, 40 años después?**

Pienso que es un proceso muy natural en cualquier entidad dedicada a la educación, que no puede limitarse a fortalecer un área específica del conocimiento sino irse abriendo poco a poco, sin independizarse totalmente de su origen. Aunque en el caso particular de la Escuela sí hubo independencia cuando se creó el programa de Economía y luego el de Administración de Empresas. Es un proceso natural que se debe al esfuerzo, al empuje de quienes permanecieron en la Escuela, porque fuimos muchos los que nos retiramos y nos quedamos apenas con una cátedra. Ellos son los que han venido moviendo todo.

**¿Hay algún propósito que todavía está por lograrse en la Escuela?**

Pienso que hoy en día lo más importante es que la Escuela haga presencia tanto en el ámbito local como en la vida nacional, que opine periódicamente sobre los problemas que tenemos, como el de las losas de Transmilenio, la movilidad, el metro, la reforma de la educación, todo lo que sucede a nuestro alrededor. Cualquier profesor de la Escuela debe opinar sobre la situación que está viviendo el país, sobre el pico y placa, sobre el tranvía por la carrera séptima. Por ejemplo, ¿cómo es posible que el país, después de tener un ferrocarril hasta el Atlántico, por influencia del que sea, lo haya dejado acabar? ¿Cómo es posible que dejara de funcionar el ferrocarril que venía de Facatativá a Bogotá, o el de Zipaquirá a Bogotá, que traían a la capital a todos los estudiantes de esas zonas?

**¿Cuál es el sello que distingue a los profesores, estudiantes y egresados de la Escuela?**

Que son gente dedicada, juiciosa y trabajadora. De pronto les falta ser más ejecutivos, más líderes.



Manuel García López

**RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI**

**¿Qué detalles recuerda de ese 20 de octubre, cuando se suscribió la Declaración de Principios?**

Recuerdo que ese día firmamos la Declaración de Principios en la oficina de Jaime Michelsen, en la sede del Banco de Colombia que quedaba en la calle 32 con séptima. Alguno de los fundadores no pudo asistir porque estaba de viaje, pero no recuerdo quién fue... De todas maneras, en el acta de fundación alguien tuvo que firmar por otro, pero no preciso quién. Es que 40 años ya hacen mella en la memoria.

Fue una ceremonia sencilla e interesante, porque significó ver realizado el sueño que nació cuando tomamos la decisión de salirnos de la Universidad Nacional. Íbamos de traje formal, porque en esa época uno no se quitaba la corbata para nada. Es decir, a ningún profesor se le ocurriría ir a dictar clase si no llevaba vestido formal con camisa blanca.

En ese entonces nuestra principal preocupación era que con esa inestabilidad tan tremenda que se vivía en la Nacional, sin continuidad en las clases, cierres temporales, interrupciones frecuentes para ir a manifestaciones en la plaza Che Guevara, la calidad de la enseñanza de la ingeniería en la universidad, que siempre había sido muy destacada y reconocida, no se viera afectada. Por eso, asistir a la ceremonia tuvo un gran significado.

Posteriormente, hubo palabras de algunos de los benefactores-fundadores y fundadores, firmamos el acta de constitución, brindamos ya. Era la culminación de un sueño, aunque después tuvimos dudas de poder concretarlo porque no llegaban las contribuciones de los benefactores... Pero bueno, eso ya es otra historia de los muchos sufrimientos que tuvimos.

Nuestro sueño se hizo realidad el día en que arrancamos las clases, el 20 de marzo de 1973. Siempre hemos celebrado esa fecha porque fue muy especial: teníamos alumnos, empezábamos clases, había horarios hechos y profesores asignados. Así se materializaban nuestros propósitos: primero, fundar la Escuela; segundo, ponerla en funcionamiento.

### ¿Cómo era ese grupo de fundadores?

El doctor Sandino era mayor que nosotros. Se había graduado hacía unos 23 años, o sea, que podría estar en los 48 años de edad. Lo seguían Ernesto Obregón y Gonzalo Jiménez, con 13 años de graduados; luego venía Luis Guillermo Aicardy, tal vez un año menor que ellos. Seguía yo, que con diez años de graduado ya había hecho mi maestría en el Massachusetts Institute of Technology (MIT), en Estados Unidos, y estaba casado. Jairo Uribe había cursado un doctorado, algo raro para la época porque lo máximo que se hacía era maestría. Jorge Eduardo Estrada había terminado su maestría en el MIT. La hicimos al tiempo, pero él se graduó unos meses antes porque, como era soltero, podía dedicarse más al estudio. Entonces, en ese momento ya éramos personas serias, pese a nuestra juventud.

### ¿Cómo se conformó el grupo?

La idea la abanderó Alejandro Sandino, quien en alguna oportunidad le había oído decir a Ignacio Umaña que con esa cantidad de paros, lo mejor era fundar una escuela de ingeniería privada. El doctor Sandino llamó a Ernesto Obregón, quien con Jorge Eduardo y conmigo seguía dictando clases como profesor de cátedra en una maestría que creamos, la de Ingeniería de Sistemas. Es que en ese tiempo no existía esa carrera en ninguna universidad del país. Ernesto había sido vicedecano de la Facultad de Ingeniería y el doctor Sandino, que era buen amigo suyo, lo llamó y le contó la idea. Lo simpático del caso es que el doctor Sandino dijo: “Necesitamos diez personas. Hagamos una cosa: tú consigues cuatro candidatos y yo otros cuatro”.



Gonzalo Jiménez Escobar



Ernesto Obregón Torres

Los cuatro recomendados de Ernesto fueron Luis Guillermo Aycardi Barrero, Gonzalo Jiménez Escobar, que había sido su compañero de promoción, Jorge Eduardo y yo. Y el doctor Sandino escogió a su vez a unos muchachos más jóvenes, que estaban trabajando en la facultad o acababan de regresar de hacer sus posgrados en Estados Unidos: Jairo Uribe, Ricardo Rincón, Manuel García y Armando Palomino.

Después de seleccionar a los candidatos, el doctor Sandino y Ernesto Obregón nos invitaron a una reunión en el Laboratorio de Diseño de Materiales para contarnos la idea. Ahí realmente nos conocimos.

**¿Qué comentaba la gente de esa empresa tan ambiciosa? ¿Pensaba que era una locura?**

Claro que sí, decían exactamente eso, que estábamos locos, que teníamos un porvenir muy grande porque todos habíamos sido estudiantes destacados. Tres de nosotros, Jairo Uribe, Jorge Eduardo Estrada y yo, habíamos sido Premio Ponce de León; había varios con grado de honor, como Armando Palomino, y becarios de la Unesco, como Gonzalo Jiménez y Manuel García. Teníamos posgrados en Estados Unidos o en Europa. Entonces nos decían: “No solamente están locos sino que se van a tirar la vida, van a fracasar y eso los va a afectar en su carrera”. Si queríamos salvar la ingeniería de la Nacional, que se destacó siempre por ser de excelencia, debíamos correr el riesgo.

**¿Qué ha significado la Escuela Colombiana de Ingeniería para usted, en todo este tiempo que le ha dedicado?**

Para mí, la Escuela ha significado muchísimo. Me ha permitido realizar un sueño, un sueño con desprendimiento, porque nunca nos reservamos el poder para controlar la institución indefinidamente. Los diez fundadores fuimos tan amplios que visitamos a otros veinte profesores de la Escuela para que nos acompañaran en la dirección. Nunca tuvimos ni la idea del negocio, ni del control, ni del poder. Simplemente queríamos, en primer lugar, conservar la calidad de la ingeniería en el país, y en segundo término, tratar de darles una opción a personas a las que, si no se les ayudaba, no podrían estudiar.

**¿Es cierto que al principio no consideraron la posibilidad de tener cafetería porque temían que se formaran corrillos?**

¡Claro! Es que la cafetería de la Universidad Nacional se volvió el centro de la revuelta, hasta el punto de que a la universidad le tocó cerrarla también porque no sólo era el centro de la revuelta sino un punto de agitación permanente. Por ejemplo, los obreros de la zona iban a almorzar allá por precios irrisorios, y los estudiantes revoltosos exigían que los atendieran. Por eso al principio no pensábamos tener cafetería, además de que en Usaquén todo el mundo salía a las tiendas cercanas.

En esa época, los profesores jóvenes y los estudiantes jugaban microfútbol los sábados, y después se iban a charlar a alguna tienda. Obviamente, cuando llegamos aquí vimos la necesidad de hacer algo.



Armando Palomino Infante

**¿Hay algún propósito de los fundadores que usted cree que no se ha logrado plenamente?**

Desde la fundación de la Escuela, tuvimos la idea de darles la opción de estudiar a personas con muchas ganas de hacer patria pero que no tuvieran los medios económicos para lograrlo. Obviamente, estábamos pensando en ayudar no sólo a los más pobres sino a los que tuvieran más ganas de estudiar, que es lo que hoy en día a uno lo frustra: ver a personas que clasifican para la matrícula mínima pero que no tienen ganas de estudiar. Tenemos que seguir trabajando en esa idea, que la hemos cristalizado parcialmente, pero no a lo largo y ancho de la Escuela.

**En el fondo, cada institución trabaja para que su comunidad lleve un sello que la identifique. ¿Qué distingue a los graduados, estudiantes y profesores de la Escuela?**

Nuestros graduados se le miden a cualquier problema. Eso lo dicen los empleadores. Un egresado de la Escuela al que se le plantea un problema de cualquier tipo le trabaja hasta que encuentra la solución. Es algo que los profesores les inculcan con su exigencia a lo largo de la carrera, desde que entran a primer semestre hasta que terminan. A nuestros egresados les falta proyectar lo que saben, que es mucho, y lo que son capaces de conseguir. Y son los profesores los que los ayudan a lograrlo. Afortunadamente, la mayoría de los profesores de la Escuela tienen la camiseta puesta y trabajan en esa dirección.

**¿Qué siente cuando mira hacia atrás y ve que en estas cuatro décadas pasaron tantas cosas? Fue bonito empezar, afrontaron dificultades y hoy han logrado tanto...**

Uno nunca debe sentir nostalgia por el pasado, sino mirar siempre hacia el futuro y sentirse orgulloso de lo bueno que ha hecho. Obviamente, recriminarse por lo que ha dejado de hacer, pero sin nostalgia. La Escuela es una institución que por su mismo enfoque tiene que ser muy bien manejada. Sin una administración juiciosa, sin mantener la calidad y el nivel de exigencia exigidos, sin graduar buenos profesionales, en un momento dado la Escuela entraría en una línea de descenso. Pienso que la Escuela va a seguir en buenas manos. Las nuevas promociones que graduamos ya han asumido el reto de sostenerla, así como también deberán hacerlo quienes las sucedan.

**Ustedes tenían una carrera exitosa cuando fundaron la Escuela. Si usted no hubiera emprendido esa empresa, lo más seguro es que hubiera desempeñado cargos mucho más altos de los que ha ocupado y a tener mayor solvencia económica...**

Sí, pero no me pesa. Probablemente si no hubiera tenido el sueño y el ancla de la Escuela, habría hecho carrera en una multinacional, fuera del país, porque adentro lo logré.

La Escuela me ha dado enormes satisfacciones, pero pienso que ha llegado el momento de colaborar con ella más en un nivel de asesoría.

**Claro que a usted le gusta enseñar...**

Sí, siempre me ha gustado darles clase a los jóvenes, porque es una labor muy dura sacarlos de esa especie de pereza en que están metidos, volverlos estudiantes universitarios y hacer que trabajen al ritmo que les exige la Escuela.

**RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ****¿Qué recuerda especialmente de ese 20 de octubre de 1972?**

El recuerdo más claro que me acompaña no corresponde específicamente al 20 de octubre, sino a lo que antecedió y lo que siguió a esa fecha. En ese orden de ideas, me acuerdo en especial de las jornadas de trabajo, en las cuales la responsabilidad siempre fue compartida y, en consecuencia, asumimos tareas definidas como un equipo perfectamente acoplado. Fue un trabajo intenso pero agradable.

**¿Cómo sintetizaría el antes, el ahora y el futuro de la Escuela, al cumplir 40 años de fundación?**

El antes lo veo como un periodo de planeación, organización y crecimiento. El ahora, como una etapa de ajuste porque se requiere tomar decisiones básicas importantes. El futuro, si se adoptan las medidas correctas, puede significar que la Escuela alcance la meta de ser parte del motor que impulse un desarrollo verdadero de la sociedad colombiana.

**Pese a todos los logros que ha alcanzado la institución y que la han consolidado por su prestigio y su aporte social, ¿hay algún propósito que usted como fundador tenía y está por conseguirse?**

Pienso que uno de los propósitos que tuvimos los fundadores y aún no se ha cumplido, por obvias razones, fue que en un corto tiempo, tal vez unos 50 años, la Escuela fuera la mejor institución latinoamericana para la formación de ingenieros. Posiblemente el enorme entusiasmo y el optimismo con respecto a nuestras capacidades contribuyeron a esperar algo lógico entonces, pero muy lejano si se mira hoy.

**¿Cuál es el sello que distingue a la comunidad de la Escuela?**

Un porcentaje apreciable de los egresados que culminaron su pregrado en los comienzos de la Escuela, hace unos quince o veinte años, se distinguen por su sólida formación profesional, su capacidad de adaptación, su cariño por la profesión y su profunda estimación a la institución.

**¿Siente nostalgia por estos 40 años recorridos en la Escuela?**

Siento cierta nostalgia por los agradables momentos compartidos con colegas y estudiantes en el claustro de Usaquén.

**¿Qué lo anima a seguir contribuyendo a la permanencia de la Escuela en el ámbito educativo del país?**

Ricardo Quintana Sighinolfi

El amor por la profesión y por la Escuela. Adicionalmente, el convencimiento de que se está forjando, mientras se acierte con la formación requerida para el inmediato futuro, el profesional que con libertad de pensamiento ayudará a lograr el objetivo de disminuir las desigualdades.

## JAIRO URIBE ESCAMILLA

### ¿Qué recuerda especialmente de ese 20 de octubre de 1972?

Mi angustia porque tuvimos que repetir una página del proyecto de Acta de Fundación y no iba a llegar a tiempo a la reunión que se había programado. Como consecuencia de esto, crucé imprudentemente la carrera octava con calle 13 y casi me atropella un taxi.

### ¿Cómo sintetizaría usted el antes, el ahora y el futuro de la Escuela, al cumplir los 40 años de fundación?

Antes la idea era contar con la mejor escuela de ingeniería civil de Colombia. Ahora tenemos en pregrado siete programas de Ingeniería, Economía, Administración de Empresas y Matemáticas, además de once especializaciones y cinco maestrías. El reto es lograr que sean reconocidos como los mejores del país. En el futuro esperamos consolidar los programas existentes, ofrecer doctorados y programas conjuntos con las mejores universidades de Colombia y del mundo, al igual que establecer unas metas de crecimiento razonable a corto, mediano y largo plazo, buscando siempre calidad más que cantidad.

### ¿Hay algún propósito que usted como fundador tenía y que está por alcanzarse?

Hay dos que tenía y que lamentablemente no hemos logrado. El primero, que estudiar en la Escuela fuera posible aun para los aspirantes sin recursos económicos. Considero que el valor mínimo de nuestras matrículas está muy por encima de las posibilidades de la inmensa mayoría de nuestra población. El segundo, que pudiéramos ofrecer el mejor posgrado en Ingeniería Civil de Suramérica, específicamente en estructuras, y que estuviera respaldado por el mejor laboratorio en ese campo. Siempre quise que la Escuela fuera una universidad donde se hiciera hincapié en la importancia de la investigación aplicada como medio de contribuir al desarrollo del país y a la solución de los problemas básicos de nuestros compatriotas.

### ¿Cuál es el sello que distingue a graduados, profesores y estudiantes de la Escuela?

Nuestros graduados deberían tener la impronta señalada en la Declaración de Principios y caracterizarse por su ética intachable, la búsqueda de la excelencia en el ejercicio de su profesión y el convencimiento absoluto de que éste implica una gran responsabilidad social. A la sociedad le corresponde evaluar si hemos logrado o no nuestro propósito.



Ricardo Rincón Hernández

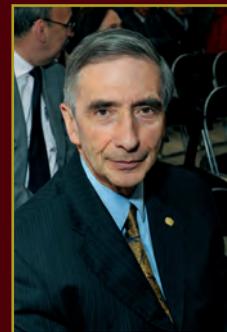


Alejandro Sandino Pardo

Un núcleo muy valioso de nuestros profesores, estudiantes y empleados se ha identificado con los ideales de la Escuela y le ha entregado a ella todo su entusiasmo y deseo de hacer las cosas bien.

**¿Siente nostalgia por estos 40 años recorridos en la Escuela? ¿Qué lo anima a seguir contribuyendo a la permanencia de la Escuela en el ámbito educativo del país?**

Recuerdo, quizás con nostalgia, los planes que tenía cuando regresé a Colombia y que sufrieron un cambio drástico cuando decidimos crear la Escuela. Añoro los primeros afanes al organizarla y ponerla en marcha en los claustros de Usaquén, con unos muchachos a quienes no les llevábamos muchos años y sin embargo creyeron en nosotros. Hoy siento una enorme satisfacción por la labor cumplida y me enorgullezco de haber aprendido y seguir aprendiendo de ellos. A la Escuela la considero mi hija y, como tal, siempre estaré dispuesto a brindarle mi apoyo en lo que necesite.



Jairo Uribe Escamilla



# Noticias

## Medalla al Mérito Académico Antonio María Gómez



### Medalla Antonio María Gómez

Antonio María Gómez fue un excepcional ingeniero calculista y profesor, conocedor como pocos de los secretos de la ingeniería estructural. Se graduó en 1939 como ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia y se vinculó inmediatamente como profesor de la Facultad de Ingeniería, donde ejerció la docencia hasta su muerte, en marzo de 1979. La Universidad Nacional le otorgó en 1962 el título de Profesor Emérito y en 1977 la Medalla al Mérito.

Como muestra de la profunda admiración que la directiva de la Escuela le profesa a este insigne ingeniero, en septiembre de 1979, el Consejo Directivo aprueba la creación de la Medalla al Mérito Antonio María Gómez para reconocer y exaltar la labor académica de profesores que, como él, durante por lo menos 20 años, se hayan distinguido por sus eminentes servicios a la enseñanza de la ingeniería.

La Escuela Colombiana de Ingeniería ha conferido esta medalla a once destacados profesores cuyos aportes académicos han significado importantes avances para la ingeniería. Estos son:

1979	Hernando Franco Sánchez
1980	Arturo Ramírez Montúfar
1981	Gustavo Perry Zubieta
1982	Alejandro Sandino Pardo
1983	Enrique Kerpel
1984	Otto de Greiff Heusler
1985	Guillermo Castillo Torres
2000	Eduardo Silva Sánchez
2006	Manuel Casabianca Pizano
2010	Luis Guillermo Aycardi Barrero
2012	Jairo Alberto Romero Rojas

La Medalla al Mérito Antonio María Gómez se configura como un reconocimiento a la labor excepcional de profesionales que entregan su vida a la academia en pro del desarrollo de la ingeniería colombiana.

### DISCURSO

*Por Jairo Alberto Romero Rojas*

Como dijo Francisco de Quevedo: “El agradecimiento es la parte principal de un hombre de bien”. Así, hoy quiero que estas palabras mías constituyan el mejor gesto de agradecimiento por otorgarme la Medalla al Mérito Académico Antonio María Gómez.

Mi gratitud a Héctor Alfonso Rodríguez Díaz, quien propuso mi nombre ante el Consejo Directivo, y a todos sus miembros por aprobar unánimemente dicha iniciativa.

Agradezco muy especialmente a mi familia, que me brinda siempre la mayor felicidad al aceptar y tolerar mis defectos, y me da lo mejor de mi vida: amor sin esperar recompensa.

Los honores los recibo con temor y prudencia. Representan la obligación y el compromiso de continuar con el mismo empeño en el trabajo y seguir estudiando y aprendiendo. Pero la ocasión de estar hoy aquí, con mi familia y mis amigos, me hace celebrar, con profunda emoción y humildad, el regocijo que se siente de ser honrado con este reconocimiento, con el afecto y el cariño de cada uno de los presentes.

En la vida es muy sabio no esperar que nos devuelvan algo por lo que hacemos, o que nos reconozcan méritos, o que los demás se den cuenta de quiénes somos. Sin embargo, hoy disfruto al máximo este reconocimiento excepcional que me concede la Escuela Colombiana de Ingeniería, especialmente porque lo comparto con distinguidos ingenieros y profesores beneficiarios como Hernando Franco Sánchez, Arturo





Ramírez Montúfar, Gustavo Perry Zubieta, Alejandro Sandino Pardo, Enrique Kerpel, Otto De Greiff, Guillermo Castillo Torres, Eduardo Silva Sánchez, Manuel Casabianca Pizano y Luis Guillermo Aycardi Barrero; con mis seres más queridos, con mis grandes amigos y con los mejores compañeros.

Hoy tengo que decirme a mí mismo que en el proceso de vivir, de aprender y de dirigir y enseñar, se logran satisfacciones que, como

la presente, son las que estimulan a seguir siempre hacia adelante, continuar creciendo y a perseguir siempre esa meta del premio supremo, representado en la satisfacción del deber cumplido.

Hoy celebro uno de los mejores momentos de mi vida, así que permítanme abusar de su benevolencia para recordar cómo a mis once años me inicié en la docencia, enseñando a leer y a escribir a los adultos de mi patria chica, Garagoa; continuando en 1964 y 1965 con mis prácticas de física en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, como monitor de los profesores Gonzalo Jiménez, Vicente Casas y Guillermo Castillo; y luego, en 1966 y 1967, como instructor asistente del doctor Albert James, profesor visitante de la Universidad de Newcastle.

A partir de 1968, el devenir docente como instructor asociado, profesor asistente, profesor asociado, director de posgrado, vicedecano y decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, profesor titular de la ESCUELA y el desempeño como ingeniero consultor y asesor en ingeniería sanitaria, transformó mi vida intelectual y me enseñó, a través del aprendizaje y de la docencia en cursos de geometría, mecánica de fluidos e ingeniería ambiental, así como en la ejecución de 70 proyectos de consultoría, en la dirección de 66 trabajos y tesis de grado y en la autoría de 10 textos y 41 publicaciones, que no hay que temer a equivocarse, porque siempre hay un mañana para tener la oportunidad de corregir.

Mi camino recorrido en la ESCUELA desde 1975, el inicio de la editorial y de la revista en 1990, la actividad docente en pregrado y posgrado, la participación en el Claustro de Electores, en el Consejo Directivo y en diferentes encargos administrativos y docentes ha estado

repleto de alegrías y grandes satisfacciones personales, como el premio Diódoro Sánchez de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, el título de profesor distinguido de la ESCUELA y lo más importante: las amistades auténticas que he tenido con mis estudiantes, compañeros y colegas, que aunque los dejo de ver a veces, siempre los tengo presentes.

Es difícil leer en mi mente todos los nombres de quienes me han colaborado y ayudado en este recorrido de 38 años por la ESCUELA, y a lo largo de mi vida profesional y personal, lo que me impide hacer mención de cada uno de ellos; pero sí deseo destacar que gracias a su apoyo y aporte hoy disfruto de la Medalla al Mérito Académico Antonio María Gómez, sentido motivo de orgullo que trasciende lo estrictamente personal para convertirse en un reconocimiento para todos los que me han asistido desde mi entorno familiar y profesional. A todos ellos, a los padres que tuve, a la familia que tengo y a todos los amigos y compañeros que me acompañan les participo y transfiero el honor que hoy se me ofrece.

Mil gracias.



Facsímil del documento enviado por el doctor Luis Guillermo Aycardi, cofundador de la Escuela.

# REVISTA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

## Alcance y política

El objetivo de la *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* es difundir artículos técnicos que contribuyan al desarrollo del país a través de una publicación con alta calidad editorial y rigor científico.

La revista acepta prioritariamente los siguientes tipos de trabajos, que le permiten mantener su categorización:

1. **Artículo de investigación científica y tecnológica.** Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. **Artículo de reflexión.** Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. **Artículo de revisión.** Documento producto de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica.

También admite artículos de las siguientes tipologías:

4. **Artículo corto.** Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren una pronta difusión.
5. **Reporte de caso.** Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular, con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico.
6. **Revisión de tema.** Documento resultado de la revisión crítica de la literatura sobre un tema en particular.

Cabe destacar que se privilegian para la revista los tipos de artículos de los numerales 1, 2 y 3.

La revista circula trimestralmente y recibe sólo artículos inéditos. Los trabajos recibidos se someten al concepto de pares académicos y del Consejo Editorial.

## Requisitos para la publicación de artículos

Los artículos presentados a la revista deben remitirse por correo electrónico a [revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co), adjuntando los siguientes formatos debidamente diligenciados: autor.doc, clasificación.doc y tipo.doc, cuyos archivos se pueden descargar de <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. En este mismo sitio está disponible la plantilla guía que contiene la estructura determinada por la revista para los artículos.

## Scope and policy

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* disseminates technology articles helping to our country development. It emphasises on its high quality print and its scientific rigour. Articles submitted for publication shall be classified into one of the following categories— which allow it keeps its indexation:

1. **Scientific and technological research article.** These documents offer a detailed description about the original findings of research projects. In general, the usually used structure contains four important sections: introduction, methodology, results and conclusions.
2. **Reflection article.** These documents present the results of a research project on a specific, interpretative, or critical view by the author about a particular topic by using original sources.
3. **Review.** A document resulting from a finished research, where the published and/or unpublished findings of investigation in a particular field of science or technology are analysed, systematised and integrated to report the progress and the development tendencies. These documents include a careful bibliographic review.

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* also accepts the following types of articles:

4. **Short article.** A brief text presenting the original, preliminary and/or partial results of a scientific or technological study, which normally need to be disseminated as quickly as possible.
5. **Case report.** A document that presents the results of a study on a specific situation in order to report the technical and methodological experiences considered in a particular case.
6. **Thematic review.** These documents are the product of a critical review of literature on a particular topic.

Our revista privilege articles as the highlight ones in numbers 1, 2 and 3.

*Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* is a quarterly publication that only accepts unpublished articles. The revista submits all the papers to the verdict of two academic peers, who evaluate the article.

## Ruling for publication

The article must be sent by e-mail to [revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co) with 3 files attached: Author.doc, Classification.doc and Type.doc available in <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>. There is also a template guide for the structure of the article (template guide.doc).

w w w . 4 - 7 2 . c o m . c o



LA RED POSTAL DE COLOMBIA

▶ Línea de Atención al Cliente Nacional ◀  
01 8000 111210