

- Nueva teoría. Presentación del libro **Lecturas sobre producción, capital y salario. Bases para una nueva teoría.**
- Estudio del control de deformaciones en puentes de concreto preesforzado, construidos in situ por voladizos sucesivos.
- Análisis de la viabilidad del aprovechamiento del acero contenido en los residuos cortopunzantes provenientes de los establecimientos de servicios de salud o similares en la ciudad de Bogotá.
- Estudio del fenómeno de la sequía en el comportamiento de los suelos arcillosos, utilizando una cámara de simulación climática.
- Construcción de ventanas con aislamiento termoacústico, mediante una estrategia basada en proyectos.
- Calidad del agua en las cuencas de los ríos Blanco, Une y Guatiquía para la evaluación regional del agua (ERA).
- Estimación de la capacidad del Programa de Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Presentación del Manual de mantenimiento de carreteras del Instituto Nacional de Vías.



CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ

VOCALES LUIS GUILLERMO AYCARDI BARRERO
SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ
MANUEL GARCÍA LÓPEZ
MARÍA DEL ROSARIO MONTEJO PERRY
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
HENRY MORENO MOSQUERA
(representante de los profesores)
NATALIA SALAMANCA CEBALLOS
(representante de los estudiantes)

RECTORA MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ

SECRETARIO RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

DIRECTOR JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

COMITÉ EDITORIAL CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES
PAULA XIMENA RÍOS REYES
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

EDICIÓN **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA
CORRECCIÓN DE ESTILO
ÉLKIN RIVERA GÓMEZ
TRADUCCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO EN INGLÉS
DAVID PEÑA CITA

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
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.

5 / EDITORIAL

Verdad

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

7-12

Nueva teoría. Presentación del libro *Lecturas sobre producción, capital y salario. Bases para una nueva teoría*

Eduardo Sarmiento Palacio

En la exposición del libro se contemplan tres partes. En la primera se hará un breve recuento de la evolución de la ciencia económica, en la segunda se realizará una evaluación de la validez de la teoría de equilibrio general que ha dominado el pensamiento económico, y en la tercera se ilustrará cómo la visión de desequilibrio permite abordar en mejor forma los quebrantos de la economía mundial y colombiana.

13-24

Estudio del control de deformaciones en puentes de concreto preesforzado, construidos en sitio por voladizos sucesivos

Nobra Adriana Rincón La Rotta - Jaime Erasmo Garzón Moreno

En este artículo se presenta un análisis comparativo de las deformaciones registradas en seis puentes durante su construcción con este sistema en Colombia y las deformaciones calculadas a partir de modelos, con el análisis de diferentes variables, así como un protocolo recomendado para el control de las deformaciones durante la construcción.

25-36

Análisis de la viabilidad del aprovechamiento del acero contenido en los residuos cortopunzantes provenientes de los establecimientos de servicios de salud o similares en la ciudad de Bogotá

David Ricardo López Guzmán - María Carolina Romero Pereira

En este artículo se analiza la viabilidad del aprovechamiento del acero que contienen los residuos hospitalarios y similares (RHS) generados por los establecimientos de servicios de salud o similares (ESS) vigilados por la Secretaría Distrital de Salud (SDS) de Bogotá, considerando aspectos técnicos, económicos y legales. Para esto, se hizo un diagnóstico sobre la gestión integral de RHS (GIRHS) en Bogotá, se analizó la normativa aplicable en Colombia y se revisaron las tecnologías disponibles a escala local para aprovechar el acero que contienen los RHS de tipo cortopunzante (RHS-C).

37-47

Estudio del fenómeno de la sequía en el comportamiento de los suelos arcillosos, utilizando una cámara de simulación climática

Catalina Lozada

En este artículo se presentan ensayos de evaporación realizados en agua y en suelo para diferentes condiciones climáticas, similares a las encontradas en la sabana de Bogotá. El suelo se preparó a partir de un estado líquido y posteriormente se secó, controlando la temperatura, la radiación infrarroja, la velocidad del viento y la humedad relativa.

49-56

Construcción de ventanas con aislamiento termoacústico, mediante una estrategia basada en proyectos

Heindel Ricardo Otero Arévalo - Carlos Collazos Morales - César Mora Ley - Jaime Isaza Ceballos - Martha Pimienta Giraldo - Liliana Pedraza Vega

La estrategia de aprendizaje basado en proyectos se ha aplicado en el curso de Ondas y Termodinámica con estudiantes de ingeniería de la Escuela Colombiana de Ingeniería en 2014-2 y 2015-1. La estrategia se centra en el aislamiento tanto térmico como acústico de la vivienda. Los estudiantes construyen prototipos de bajo costo y utilizan ciclo experimental (predicción, observación, validación). Esta metodología de enseñanza mejora el aprendizaje de la termodinámica y la acústica.

57-67

Calidad del agua en las cuencas de los ríos Blanco, Une y Guatiquía para la evaluación regional del agua (ERA)

Yuly Andrea Sánchez Londoño

En este artículo se presentan los resultados del estudio realizado para la evaluación regional del agua (ERA) por la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB) de las cuencas de los ríos Blanco, Une y Guatiquía, donde se seleccionaron puntos de monitoreo para determinar la calidad del agua en relación con parámetros físicos, químicos y microbiológicos, y establecer los indicadores de índice de calidad del agua (ICA), Water Quality Index (WQI) e índice de alteración potencial de la calidad del agua (Iacal).

69-76

Estimación de la capacidad del Programa de Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Sonia Alexandra Jaimes Suárez - Carlos Rodrigo Ruiz Cruz - Carolina Castro - Sebastián Gordillo - Sebastián Meza - Juan Niño

El propósito de este artículo es presentar una metodología para la estimación de la capacidad de un programa académico, en particular del Programa de Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Se desarrollaron dos fases. En la primera se define el concepto de capacidad de un programa académico y se desarrolla un modelo analítico que permite la evaluación de escenarios, en tanto que en la segunda se usa la dinámica de sistemas para la caracterización de la demanda y el flujo de estudiantes.

77-89

Presentación del *Manual de mantenimiento de carreteras* del Instituto Nacional de Vías

Fernando Sánchez Sabogal

En este artículo se ofrece un extracto de las palabras dirigidas al auditorio por el ingeniero Sánchez durante el acto de lanzamiento del *Manual de mantenimiento de carreteras* el día 5 de abril de 2017 en el Auditorio A-301 de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

91 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Verdad

ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

Profesor titular, miembro del Consejo Directivo y miembro adherente del Claustro de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co

La palabra *verdad* tiene sentidos distintos en las lenguas clásicas. En griego, es “ἀλήθεια” (*aletheia*), concepto filosófico que se refiere a la sinceridad de los hechos y la realidad: “Aquello que no está oculto, aquello que es evidente”, “lo que es verdadero”, “lo que se manifiesta claramente, tal y como es en su ser”.

Si los griegos hablaban de la verdad como el ser de las cosas que se muestran tal y como son, los latinos se referían a la verdad de las palabras y las personas. En lugar del sustantivo abstracto *veritas*, se usaba el adjetivo *verus* para denominar a las palabras o las personas firmes que podían ser puestas a prueba o sometidas a juicio. *Verdadera* era la palabra firme y seria, la palabra que se puede mantener, que no se dice a la ligera o para halagar a quien la oye. Cicerón distinguía al demagogo, superficial y adulador, del hombre que es *constans, verus, gravis*, y existía la expresión *vera pro gratis* (“las cosas verdaderas en lugar de las gratas”).

Para los judíos, la verdad tenía un sentido distinto. En hebreo, el término *verdad* es *emet* (אמת), que no tiene el significado de la cosa ya realizada, sino el de una acción que está por hacerse. Por eso, *verdad* quiere decir, ante todo, “confianza”. El verbo raíz de esta palabra es *aman* (de donde viene “amén”, אמן), que se traduce por “confirmar”, “apoyar”, “respaldar”, en el sentido de dar nuestra confianza a algo que está por hacerse. Un término relacionado es *emun*: el artesano con un talento seguro y que, por lo tanto, tiene toda nuestra confianza.

El idioma árabe añade un aspecto afectivo a esta idea de verdad entendida como confianza. El verbo *sadaqa* (قَدَص) significa “ser sincero”, “verídico”, “decir la verdad”, y es el origen de la palabra *amigo*, *sadyq* (“قديص”). Amigo es aquel a quien se dice la verdad y de quien escuchamos la verdad, aquel en quien confiamos. Se mantiene una amistad, al igual que cuando el amor se da con ternura y con cariño.

Tomo como referencia esta palabra y su etimología para hacer una reflexión muy sencilla sobre la educación universitaria en Colombia, sobre lo que se propone y sobre lo que se construye. No se puede dudar de las mejores y genuinas intenciones, los propósitos y acciones que nos llevan a buscar y ofrecer una educación superior competitiva y global, integral, de alta calidad tanto en el pregrado como en el posgrado, con una investigación sólida y productiva para ayudar a resolver las necesidades de nuestro medio y de la humanidad, obviamente con la ampliación del conocimiento.

Según lo establecido por el Estado, para lograr estos objetivos hoy resulta indispensable cumplir con una serie de requisitos que incluyen registros calificados, procesos y modelos de autoevaluación para cada programa y para la institución, proyectos educativos, modelos de educación virtual y uso de herramientas tecnológicas, documentos maestros, altos títulos de los profesores, artículos en revistas indexadas, viajes nacionales e internacionales a presentar ponencias, visita de pares... En fin, una serie de condiciones que exigen mucho tiempo

y recursos. Además de estos requisitos, se recomienda muy especialmente que se busquen las acreditaciones internacionales y ojalá estar bien posicionados en los escalafones tanto de Colombia como del exterior.

Estos son los criterios que hoy se deben emplear en las universidades para garantizar la verdad del trabajo que cada institución realiza. Pero en esta verdad, de acuerdo con los procedimientos que conozco, tienen muy poca o ninguna importancia el profesor, su calidad, su cumplimiento, si se ofrece una buena clase, el contenido del curso y si se consiguen sus objetivos. Igual ocurre con la investigación y la extensión que se hacen: no interesa si éstas son útiles y si, por tanto, deben generar recursos para que sean válidas y autosostenibles; lo importante es que se produzcan artículos y que aparezcan publicados en revistas, ojalá indexadas. Es hora de que cada universidad asuma esta verdad sobre la educación superior en Colombia, a partir de una autocrítica constructiva.

Cuánto camino se ha recorrido desde aquellas épocas de la autonomía universitaria y la actual, en la que es necesario obtener una acreditación de alta calidad, exigida por el Estado. Cuántas modificaciones se han hecho. Cabe preguntarse, entonces, ¿para qué estos cambios? ¿De verdad han servido? ¿Cuál es la verdad y cuál es el compromiso de las universidades con el país?

Al final, independientemente de si los objetivos se cumplieron o no, hoy todo se puede convertir en una verdad.

Como anécdota, vale la pena traer a colación el caso de la Universidad de Harvard, uno de los centros de educación superior más prestigiosos del mundo, donde se han graduado exitosos empresarios y políticos, y dictan cátedra maestros con gran erudición, reputación, experiencia y reconocimiento en investigación, ciencia y tecnología. Su lema (que se encuentra en la parte superior del escudo institucional) es “VE-RI-TAS”, palabra latina que significa “verdad”.

En su campus existe un monumento dedicado a la memoria de la fundación de la universidad, y en su placa conmemorativa se dice que John Harvard fue su “fundador”, en 1638. Ese monumento se conoce públicamente como “la estatua de las tres mentiras” por las siguientes razones: en la inscripción se puede leer que la universidad se fundó en 1638, cuando en realidad lo fue dos años antes, en 1636. No fue John Harvard quien fundó la universidad, sino unos colonos ingleses el 8 de septiembre de 1636, con el nombre de New College o College at New Towne. Harvard donó más de quinientos libros para la biblioteca y una importante suma de dinero, por lo que el 13 de marzo de 1639 se cambió su denominación a Harvard College. Por último, la estatua la hizo el escultor Daniel Chester French, quien utilizó como modelo a un estudiante llamado Sherman Hoar, pues en ese tiempo no se conocía el aspecto físico de John Harvard.

Nueva teoría

Presentación del libro *Lecturas sobre producción, capital y salario. Bases para una nueva teoría*

EDUARDO SARMIENTO PALACIO

Director del Centro de Estudios Económicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

eduardo.sarmiento@escuelaing.edu.co

La exposición del libro contempla tres partes. En la primera haré un breve recuento de la evolución de la ciencia económica, en la segunda realizaré una evaluación de la validez de la teoría de equilibrio general que ha dominado el pensamiento económico, y en la tercera ilustraré cómo la visión de desequilibrio permite abordar en mejor forma los quebrantos de la economía mundial y colombiana.

Los pensadores clásicos giraron en torno a la ley de Say, derivada del principio físico de la conservación de la energía. Por simple analogía consideraron que la oferta de bienes se transformaba en demanda. La formalización algebraica se presentaba como la suma de ofertas menos la suma de demandas igual a cero. Sin embargo, la relación nunca se confrontó empíricamente, en parte por la falta de información.

No sobra recordar que en el siglo XIX se hicieron grandes descubrimientos de relaciones de la física que se cumplen como identidades matemáticas y motivaron la ley de Say. El fenómeno era comprensible en la física, que es altamente influida por factores de la naturaleza que recaen en objetos homogéneos. No sucedía lo mismo en la economía, que es afectada por factores sociales que inciden sobre seres humanos. No se podía esperar que las leyes analizadas durante varios años y verificadas en laboratorios se pudieran adoptar por la

analogía. Los postulados de Smith, Ricardo y Say, que tenían un alto contenido filosófico y retórico, carecían de la formalización para confrontarlos empíricamente.

A Keynes le tomó mucho tiempo, más de medio siglo, advertir en la Teoría General que la ley era falsa e increpar a los clásicos por haberla mantenido sin mayor justificación. Más aún, los responsabilizó de los desaciertos que causaron recesión, desempleo y penuria. Por su parte, los seguidores de Keynes y los pensadores mejor preparados de la época coincidieron en que la expresión en términos de la sumatoria de los excesos de demanda sobre la oferta que igualan a cero no se cumplía como una identidad matemática por la simple razón de que las ofertas y demandas son determinadas por agentes diferentes. Sólo en condiciones especiales la suma de las ofertas de bienes puede igualar la demanda.

El supuesto de que la ley de Say les dio a las economías la apariencia de cuerpo perfecto. La simple producción garantiza la demanda e incluso el beneficio social. Adicionalmente, estaban blindadas contra el desempleo, las recesiones y los ciclos.

Los cuestionamientos de Keynes tuvieron una gran receptividad política e institucional. La planeación indicativa, la política fiscal y la presencia del Estado en áreas críticas se convirtieron en los elementos centrales para promover el desarrollo y la equidad. Por lo demás,

La exposición del libro contempla tres partes. En la primera haré un breve recuento de la evolución de la ciencia económica, en la segunda realizaré una evaluación de la validez de la teoría de equilibrio general que ha dominado el pensamiento económico, y en la tercera ilustraré cómo la visión de desequilibrio permite abordar en mejor forma los quebrantos de la economía mundial y colombiana.

le abrió el camino al modelo IS-LM de Hicks, en el cual caben las dos visiones y suministra un marco analítico neutral para discutir la determinación de la economía, al igual que las políticas fiscales y monetarias. Se encuentra que las políticas fiscales y monetarias están en capacidad de conducir la economía al pleno empleo, estabilidad de balanza de pagos y control de la inflación. En ese sentido, la ciencia económica suministraba las bases para la sostenibilidad del sistema.

El modelo reconoce la presencia de desequilibrios ocasionados por la demanda y muestra cómo las políticas fiscales pueden corregirlos y conciliar el pleno empleo y el control de la inflación. Sin embargo, no se ha logrado avanzar con respecto a la formulación de Hicks de 1937. La formulación de Mundell y Fleming, que incorpora el sector externo, extiende el resultado para economías abiertas, pero sólo para el caso en que la tasa de interés es positiva y la balanza de pagos es altamente sensible al tipo de cambio. Si la tasa de interés es cero y la balanza de pagos, en particular las exportaciones, es inelástica a la tasa de cambio, el número de variables exógenas resulta inferior al número de ecuaciones. La máxima actividad productiva, el control de la inflación y la estabilidad de la balanza de pagos no se pueden alcanzar aisladamente; el logro de un objetivo está condicionado al incumplimiento de los otros.

Este comportamiento se observó en Europa luego de la crisis de 2008. El crecimiento de los países periféricos se alcanzó a cambio de déficits en cuenta corriente

que no eran sostenibles. El balance de las cuentas externas se conseguía con reducción de salarios y baja actividad productiva. La normalización de las economías se logró a cambio de una contracción draconiana de los salarios y el empleo.

Lo mismo le está sucediendo en la actualidad a América Latina, en particular a Colombia. La caída de los precios del petróleo se manifestó en un déficit en cuenta corriente de más del 6% del PIB. El desajuste se buscó corregir con una devaluación masiva y el alza en la tasa de interés, que redujo el desajuste externo a cambio de disminuir la actividad productiva y colocarla cerca de la recesión en la actualidad. Ahora, en el desespero, se busca reactivar la producción volviendo a ampliar el déficit en cuenta corriente. No hay cuándo terminar. No se cumple el requisito fundamental de igualdad entre instrumentos y objetivos. La igualación de variables exógenas y ecuaciones sólo se podrá conseguir con una mayor intervención pública en la economía e incluso con la coordinación mundial de las políticas cambiarias, monetarias y fiscales.

Si bien Keynes amplió la gestión del Estado, le puso diques al mercado y tuvo una gran influencia en los círculos del poder, su objeción vertical a las formulaciones de una economía en equilibrio, y más concretamente a la ley de Say como identidad o igualdad, nunca se incorporó en la fundamentación económica. En pleno auge keynesiano, los esfuerzos académicos en las universidades más influyentes, desde Walras en 1890, se orientan a validar la teoría de equilibrio general. Así, el trabajo de Arrow y Debreu (1954), sin duda el aporte más reconocido del siglo, fue la culminación de este proceso. En virtud de la aplicación de las técnicas más avanzadas de las matemáticas, en particular de la topología, se prueban la existencia y la optimalidad del mercado. Con base en el teorema de punto fijo, se encuentra que las acciones individuales para obtener el máximo lucro y la competencia conducen a un estado en que las ofertas y demandas se igualan y alcanzan la máxima eficiencia en el sentido de Pareto.

La ley de Say se revivió como igualdad. En el fondo, se reafirma el principio de la mano invisible de Adam Smith y Ricardo. Las acciones para maximizar ganancias y utilidades son convertidas por la competencia en beneficios para toda la sociedad. El resultado le dio un poder sobrenatural al mercado, que todo lo puede hacer. De allí surgió la notificación de la Universidad de Chicago

de que el equilibrio estocástico general constituye la mejor representación de las economías y el neoliberalismo adquiere sustento científico. Así, el Consenso de Washington presenta la liberación indiscriminada de los mercados como el camino al progreso y el desarrollo que ninguna otra organización puede lograr.

Lo más grave es que le abrió camino a todo tipo de paradigmas basados en el equilibrio. La construcción microeconómica se adapta para satisfacer el concepto general de lo que quisieran los economistas que fuera el mundo y no de la evidencia macroeconómica. El resultado es una proliferación de paradigmas que establecen que la economía trabaja en condiciones de mercado que no corresponden a la realidad y que se controvierten a lo largo del libro. Veamos las más serias.

El sector financiero es una fuente de especulación y de ganancias desproporcionadas del capital. Las rentabilidades de las acciones no se igualan y los intermediarios financieros operan dentro de pirámides. En los países en desarrollo, el comercio internacional conduce a estructuras deficitarias de baja complejidad y altamente dependientes de la inversión extranjera. El mercado discrimina contra la industria y la agricultura, las actividades de mayor productividad y demanda mundial, por la vía de la inelasticidad de demanda y de la productividad relativa. El mercado laboral propicia monumentales diferencias entre ejecutivos y trabajadores. El mercado no conduce al máximo crecimiento. No es cierto que el mayor crecimiento se dé cuando el capital y el producto evolucionan al mismo ritmo. Se da, más bien, cuando los agentes externos intervienen en el ahorro para mantener el crecimiento del capital por encima del producto. La productividad de la mano de obra no garantiza por sí sola el máximo crecimiento y el retorno del capital supera el crecimiento del producto. El mercado no tiene el poder para llevar a situaciones eficientes y equitativas. En todas las actividades, las fuerzas inequitativas prevalecen sobre las fuerzas de la eficiencia y el crecimiento está en abierto conflicto con la distribución del ingreso. Por lo general, se trata de mercados en que las ofertas y las demandas no se igualan, el criterio de Pareto no se cumple y se pueden determinar sesgos inequitativos.

El panorama descrito constituye una clara evidencia de más de 50 años de que los supuestos matemáticos adoptados para probar el equilibrio competitivo no corresponden a la observación de las economías. Las

economías no tienden a estados en que las ofertas y las demandas se igualan y dan lugar a la máxima eficacia en el sentido de Pareto. No se valida el principio de la mano invisible de Adam Smith; la competencia no está en capacidad de convertir los esfuerzos individuales por el lucro en beneficios sociales. El teorema de punto fijo no es aplicable en un mundo con dinero, pirámides, inelasticidad de demanda y economías de escala. Tal como se muestra en el capítulo 3, en condiciones de exceso de demanda de dinero, que es la característica dominante de las recesiones, el sistema económico tiende a un estado generalizado de sobreproducción, que es inestable e ineficiente. El mercado monetario no actúa como los mercados de bienes perecederos. Los postulados de la ley de Say y de existencia del equilibrio competitivo no se cumplen en condiciones de desequilibrio monetario.

La situación de desajuste entre la oferta y la demanda más ilustrativa se presenta en las economías abiertas que trabajan con déficit en cuenta corriente. Como la demanda de bienes transables es mayor que la oferta, la economía opera con un exceso de demanda de bienes y tiene que compensarse con un exceso de oferta de dinero. Si este exceso de oferta no se genera, la oferta de bienes sería superior a la demanda y la economía quedaría expuesta a fuertes políticas contractivas. Así, los choques provenientes de reducción de los ingresos externos aumentan los excesos de oferta de dinero, y si no se materializan, el sistema se precipita en caída libre. El desconocimiento de este comportamiento llevó a la recesión de 1999 y a la caída del producto en los últimos dos años.





Quiérase o no, estamos en un mundo de desequilibrio económico que parece ser la representación más previsible para un área cuyos principales actores son los seres humanos. En general, se presentan situaciones de eficiencia e inequidades que se deben corregir en el origen. De todas formas, el mayor margen de maniobra se encuentra en la macroeconomía. Los desequilibrios tienen su manifestación más clara y de conjunto en el crecimiento económico y la distribución del ingreso, que son las variables síntesis más críticas de la economía.

Sin ir lejos, los desequilibrios ocasionaron la recesión del 2008, la crisis recesiva de Europa y los quebrantos de balanza de pagos de América Latina, que la han sumido en un estado de tasas de crecimiento cercanas a cero. Como lo anticipamos en 2008, la economía mundial experimentó en los últimos diez años una caída del ahorro con respecto a la inversión, que tiene su manifestación en una tasa de interés real que ha venido declinando. En la actualidad, se encuentra alrededor de cero. Se configuró un exceso de ingresos con respecto a los gastos que limita la producción y genera grandes choques de demanda. El mercado, los estímulos tecnológicos y la política monetaria no están en capacidad de movilizar a los países desarrollados, en particular Estados Unidos. El comportamiento ha dejado sin piso a los pensadores de oferta, como Eaton y Gordon, que presentan la innovación, la productividad y la automatización como el camino al progreso y al desarrollo. Debido a la falta de demanda, hoy en día los aumentos de la productividad del capital o del trabajo, como no disponen de compradores, dan lugar a una reducción

del empleo y un desplazamiento de los trabajadores a sectores de menor productividad. Así, la productividad del trabajo aumenta menos que producción.

Por otra parte, en los países en desarrollo el comercio internacional y el ahorro resultan en bajas productividades del trabajo. El mercado no conduce a la máxima productividad del trabajo y ésta no garantiza el máximo crecimiento. El exceso de ahorro mundial es la consecuencia de un desbalance que no lo corrigen el mercado ni las acciones aisladas. Los países desarrollados operan con alta productividad del trabajo y ahorro sobrante, en tanto que los países en desarrollo trabajan con baja productividad del trabajo y escaso ahorro. La solución es que los países desarrollados disminuyan el ahorro y los emergentes lo suban. Para tal efecto, los países desarrollados deben configurar déficits en cuenta corriente y los emergentes, superávits. La gran duda es cómo se consigue el alto ahorro en los países emergentes con la equidad. No hay otra forma que la elevación del ahorro del capital mediante regulación del sector financiero que obtiene ganancias desproporcionadas y la severa limitación al ocultamiento y salidas de patrimonio.

El desequilibrio más alarmante está en la distribución del ingreso. La constante del mundo en los últimos 25 años ha sido la ampliación de las desigualdades. En una muestra de 50 países, 35 han experimentado una reducción de los ingresos del trabajo con respecto al producto y un deterioro en la distribución del ingreso. El retroceso se presentó con gran severidad en Colombia, que aparece entre los cinco países con peor distribución del ingreso del globo.

Esta es una clara evidencia en contra de la segunda ley de la teoría neoclásica, que establece que el crecimiento y la distribución del ingreso son separables y que cada uno puede alcanzarse aisladamente. En consecuencia, considera que la distribución del ingreso se puede mejorar con impuestos proporcionales a la renta, sin afectar el crecimiento económico.

En medio de la pasividad oficial, Piketty irrumpe revelando información alarmante. Muestra que durante más de un siglo el retorno del capital se ha colocado por encima del crecimiento, y como los ingresos del capital son mayores que los del trabajo, aparece como la principal causa del deterioro mundial de la distribución del ingreso. Infortunadamente, el hallazgo se vio deslucido por la interpretación de las causas.

Piketty atribuye el deterioro de la distribución del ingreso a la caída de la productividad del capital y a la elasticidad de sustitución entre el capital y el trabajo mayor que uno, que son exógenos al sistema económico. Paradójicamente, cae en la trampa de la segunda ley neoclásica de que la distribución del ingreso puede mejorarse sin afectar la actividad productiva. El resultado está fundamentado en el supuesto de elasticidad de sustitución del capital por el trabajo mayor que uno, que es totalmente controvertido por la evidencia empírica de 60 años. En todos los estudios se encuentra que este parámetro fluctúa entre 0,4 y 0,60. Así las cosas, el deterioro de la distribución del ingreso sólo se da por una acción deliberada para reducir el salario con respecto a la productividad.

Mi interpretación es totalmente distinta. Existe un abierto conflicto entre la distribución del ingreso y el crecimiento. La verdadera causa del deterioro de la distribución del ingreso en Colombia es la caída del salario en relación con la productividad ocasionada por acciones para elevar el ahorro y por el comercio internacional. En este sentido, la solución de la distribución del ingreso requiere un alza del salario que compense las pérdidas acumuladas del pasado. En la práctica, se podría materializar con la elevación del salario mínimo, subsidio a la contratación de trabajadores informales y una política fiscal progresiva, orientada a incrementar los ingresos del trabajo con respecto al capital. El efecto sobre el crecimiento económico puede evitarse con una elevación del ahorro del capital y un sistema de protección basado en el aprendizaje en el oficio y las economías de escala.

En fin, se requiere un modelo que enfrente los desequilibrios económicos previsibles en una disciplina cuyos principales actores son los seres humanos. De ninguna manera se trata de un sistema de caos irremediable. En todas las áreas críticas se dispone de teorías que se han analizado durante varios años y se han incluido en libros y presentaciones en los más variados foros y, lo más importante, confrontados durante medio siglo ante el ácido de los hechos. Su aplicación permite erradicar las imperfecciones y perversidades del comercio internacional, el mercado laboral y el sector financiero, asegurar la estabilidad de la balanza de pagos y la eficacia de las políticas macroeconómicas, configurar una estructura económica liderada por la industria y la agricultura, y superar el conflicto entre la distribución del ingreso y

el crecimiento. El sistema quedaría en condiciones de acelerar el crecimiento, afianzar la estabilidad y mejorar en forma notable la distribución del ingreso dentro de un marco que puede resumirse en siete puntos.

Los elementos centrales del modelo son un marco institucional para disminuir los sesgos en contra de la distribución del ingreso y una estrategia para reducir las desigualdades, con el mínimo efecto sobre la acumulación y el crecimiento. Lo primero se puede hacer con disposiciones que mejoren el funcionamiento de los mercados y reduzcan las desigualdades. En el sector financiero es indispensable una severa regulación que evite la especulación, las pirámides, al tiempo que eleve el ahorro del capital. En el comercio internacional se requiere una organización selectiva que reduzca el vínculo entre el salario y las exportaciones, y con una política que armonice las facilidades de producir y la demanda, es decir, que concilie las ventajas comparativas y las absolutas. En el mercado monetario es necesario pasar a un nuevo orden que dé prioridad a la producción y la estabilidad cambiaria, que opere con tipo de cambio regulado y reconozca el presupuesto desbalanceado. En la escogencia de sectores habría que concederles una prioridad abierta a la industria y a la agricultura. En materia educativa se plantea una educación pública integrada, en la que todos los jóvenes concurren a las mismas escuelas. En materia laboral es forzosa una gran política, orientada a reducir la informalidad, elevar el salario de los grupos menos favorecidos y frenar las remuneraciones de los altos funcionarios.

En síntesis, el crecimiento económico debe ser el resultado de una alta productividad del trabajo inducida por el trípode de la industrialización, la elevación del ahorro y la conformación de superávits en cuenta corriente.

La verdadera causa del deterioro de la distribución del ingreso en Colombia es la caída del salario en relación con la productividad ocasionada por el ahorro y el comercio internacional.

El aspecto más polémico es la conciliación de la distribución y el crecimiento económico. El primero es un impuesto que cierre la brecha entre el retorno del capital y el crecimiento, y el segundo es la movilización de los recaudos para subsidiar la contratación de trabajadores provenientes del sector informal, la realización de proyectos agrícolas y la implementación de exenciones para la financiación de la inversión en áreas críticas. Adicionalmente, se requieren otras determinaciones para aumentar el ahorro del capital, tales como la regulación financiera, la reducción del margen de intermediación, y el endurecimiento de las acciones para frenar las salidas y ocultamientos de patrimonios.

REFERENCIAS

- Arrow, K. & Debreu, G. (1954). Existence of equilibrium for a competitive economics. *Econometrica*, 22.
- Atkinson, A.B. (2015). *Inequality: what can be done?* Harvard University Press Cambridge (Massachusetts), and London (England).
- Clower, R.W. (1965). The Keynesian counterrevolution: A theoretical appraisal. En F.H. Hahn & F.P.R. Brechlig (eds.). *The theory of interest rates*. Londres: Macmillan.
- Gordon, R. J. (2016). *The rise and fall of American growth*. Princeton University Press.
- Hicks, J.R. (abril de 1937). Mr. Keynes and the "classics": A suggested interpretation. *Econometrica* 5, 147-159. Reprinted in *Reading in the Theory of Income Distribution*. Filadelfia: Blakiston for the American Economic Association, 1946, 461-476.
- Keynes, J.M. (1936). *The general theory of employment, interest and money*. Nueva York: Palgrave Macmillan.
- Lange, O. (1942). Say law: A restatement and criticism. En O. Lange, *Studies in mathematical economics and econometrics*. Chicago: University of Chicago Press.
- Patinkin, D. (1956). *Money, interest and prices*. Evanston, In.: Row, Peterson and Co.
- Stiglitz, J.E. (2002). *El malestar de la globalización*. Madrid: Tauros.
- Sarmiento, E. (2008). *Economía y globalización*. Bogotá: Grupo Editorial Norma.
- Sarmiento, E. (2011). *Transformación productiva y equidad*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sarmiento, E. (2017). *Lecturas sobre producción, capital y salario. Bases para una nueva teoría*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sarmiento, E. (2002). *El modelo propio*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Estudio del control de deformaciones en puentes de concreto preesforzado, construidos en sitio por voladizos sucesivos

Study about deformations in pre-stressed concrete bridges, built in situ through progressive cantilever method

NOHRA ADRIANA RINCÓN LA ROTTA¹ - JAIME ERASMO GARZÓN MORENO²

1. Ingeniera civil. Especialista en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Magíster en Ingeniería Civil.

2. Ingeniero civil. Especialista en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

ing.narl@gmail.com - jagarz07@gmail.com

Recibido: 10/11/2016 Aceptado: 08/01/2017

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

Resumen

La ejecución de puentes preesforzados, construidos en sitio por voladizos sucesivos, es una de las opciones más empleadas en las últimas décadas en Colombia para las vías principales en las que se necesitan frecuentemente estructuras de luces entre 60 y 200 m, para superar grandes obstáculos.

La utilización de este sistema requiere especial control en las deformaciones producidas durante todas las fases constructivas de los puentes, así como un manejo adecuado en la colocación y nivelación de la formaleta para proporcionar las contraflechas definidas por el diseñador estructural, necesarias en cada etapa de la construcción para suministrar un óptimo servicio de las estructuras.

En este artículo se presenta un análisis comparativo de las deformaciones registradas en seis puentes durante su construcción con este sistema en Colombia y las deformaciones calculadas a partir de modelos, con el análisis de diferentes variables, así como un protocolo recomendado para el control de las deformaciones durante la construcción.

Palabras claves: voladizos, construidos en sitio, control de deformaciones.

Abstract

In-situ building of pre-stressed bridges through progressive cantilever method is one of the most popular choices in Colombia for main roads that frequently need 60m to 200m long structures to overcome big obstacles.

To use this system, special control is needed with the deformations created during every stage of the construction process, as well as adequate handling when placing and levelling forms to provide all precambers defined by the structural designer, needed in every construction phase to guarantee optimal service for the structures.

This article shows a comparative analysis of deformations recorded in six bridges during their construction in Colombia using this method and the calculated deformations based on models, analyzing different variables, as well as a recommended protocol to control deformations during their construction.

Keywords: cantilever; in-situ building; deformations control.

INTRODUCCIÓN

Durante el levantamiento de los puentes de concreto preesforzado construidos en sitio por voladizos sucesivos, se presentan en principio deformaciones instantáneas y posteriormente se presentan otras, a largo plazo. Puesto que los voladizos se componen de dovelas de concreto preesforzado con edades diferentes, estas deformaciones se deben calcular con suficiente exactitud en el diseño estructural, para determinar las contraflechas que hay que dar a la formaleta, los equipos móviles o los carros de avance en cada etapa constructiva.

El estudio y control de las deformaciones para esta clase de puentes no se encuentra explícitamente establecido en el Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (ref. 17), ya que en el código se especifica que esta clase de puentes no están cubiertos por los requisitos dispuestos en él, por lo que se debe utilizar otra norma, como por ejemplo la Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges de AASHTO (ref. 19). Por las condiciones topográficas de Colombia, la construcción de estos puentes se ha incrementado en las dos últimas décadas en el país y, por lo tanto, se considera necesario profundizar en el estudio de este tema, en el fin de conocer y controlar con mayor exactitud las deformaciones producidas en estas estructuras.

En este artículo se profundiza en el tema de las deformaciones producidas durante el levantamiento de los puentes de concreto preesforzado construidos en sitio por voladizos sucesivos, utilizando la comparación cualitativa realizada de las deformaciones teóricas de seis puentes de este tipo, calculadas con el programa de diseño estructural Midas Civil 2011 (ref. 16) y las deformaciones reales obtenidas del control en obra de éstos.

CONSTRUCCIÓN EN SITIO POR VOLADIZOS SUCESIVOS

El método de construcción en sitio de puentes por voladizos sucesivos se da a partir del sistema de concreto postensado y la construcción en sitio de dovelas mediante formaleta móvil sostenida en el tramo ejecutado.

De acuerdo con la experiencia de todos los puentes construidos se considera que el rango óptimo para esta metodología constructiva, desde el punto de vista económico, se encuentra entre los 125 y 175 m de luz (ref. 9). Actualmente, la ampliación de carreteras en Colombia ha traído consigo la construcción de puentes con grandes luces, en los que las dovelas de concreto preesforzado construidas en sitio mediante el método de los voladizos sucesivos han sido de las más usadas y aceptadas. Esta clase de puentes se puede construir en sitio mediante varios procesos (figura 1) (ref. 1).

El procedimiento con carros de avance soportados por el tablero es el más frecuente y el que se utilizó en los puentes que se analizaron.

Las longitudes usuales de las dovelas van desde tres hasta cinco metros y la sección transversal más común es la de tipo cajón de una sola celda, por ser ésta una de las más eficientes para su construcción.

El soporte de los voladizos se realiza mediante cables de preesforzado de longitud creciente dispuestos y anclados comúnmente en la losa superior en cada dovela, que se tensionan cuando ya ésta ha fraguado y ha conseguido la resistencia suficiente para soportar la fuerza del postensado.

Con un ciclo de avance de siete días, se puede programar y realizar en forma consecutiva la construcción de 25 a 42 m lineales de tablero al mes, aproximadamente.

El sistema de fijación permite la estabilidad de los voladizos bajo cargas diferenciales del peso propio de los carros de avance, concreto fresco de las dovelas en construcción, cargas de otros equipos, cargas vivas temporales y otras cargas, como viento o sismo durante la construcción.



Figura 1. Métodos constructivos de dovelas en sitio.

En la siguiente figura se muestra una vista superior de un capitel, en el que se localiza el sistema de fijación temporal utilizado en los puentes analizados, con barras de alta resistencia como elementos a tracción, gatos de arena como elementos a compresión y los aisladores sísmicos definitivos, ensamblados antes de la ejecución de la dovela inicial (figura 2) (ref. 15).



Figura 2. Sistema de fijación en construcción. Barras y gatos.

Después de la construcción de los dos voladizos centrales, éstos se unen entre sí con un sistema continuo, que consiste en unir los voladizos mediante una dovela de cierre construida en sitio y la colocación de los cables de continuidad, dispuestos normalmente en la losa inferior del tablero.

Hecha la unión de los voladizos como en el caso de un sistema continuo, luego de tensionar los cables de continuidad, los cuales generan reacciones hiperestáticas, se termina el procedimiento de construcción del puente con la colocación del pavimento, barreras de tráfico, andenes y barandas, y se da paso al tráfico vehicular poniendo en servicio la estructura.

EL PROBLEMA DE LAS DEFORMACIONES

En la construcción de los puentes por voladizos, existen dos posibilidades: la construcción en sitio o el sistema industrializado de prefabricación de dovelas. Las deformaciones producidas en cada caso son diferentes, siendo mayores dos a tres veces en el caso de los construidos en sitio (figura 3). En este caso, se tratarán los tableros construidos en sitio, ya que los puentes analizados se levantaron con dicha metodología, continuamente utilizada en el país.

Las dovelas de concreto preesforzado tienen diferentes edades en cada ciclo de avance, por lo que la variación en las propiedades de los materiales se debe tener en cuenta en el cálculo de esfuerzos y deformaciones para cada etapa constructiva.

El conocimiento exacto del comportamiento de los materiales a largo plazo sometidos a cargas permanentes, utilizado para la previsión de los esfuerzos y de las deformaciones por efectos reológicos, como el flujo plástico y la retracción del fraguado del concreto, es un

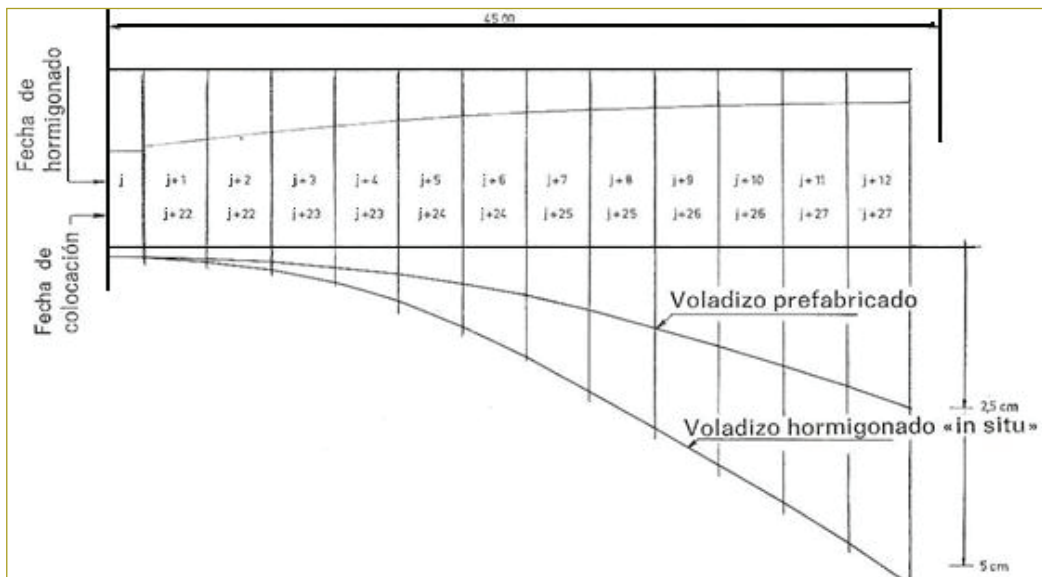


Figura 3. Comparación entre deformaciones: construido en sitio y prefabricado (ref. 1).

tema complejo de estudio, ya que es necesario realizar análisis evolutivos de los materiales para cada estructura en particular. Las deformaciones causadas por las variables estudiadas a corto plazo se determinan mediante un análisis estático en cada etapa de construcción y un análisis hiperestático durante las etapas posteriores al cierre de los voladizos.

Todas las deformaciones calculadas en cada etapa constructiva se van acumulando, hasta obtener finalmente el diagrama de deformaciones máximas en cada junta generada en las uniones entre dovelas. La acumulación final de estas deformaciones representa el diagrama de Camber, que muestra en las ordenadas las contraflechas definidas por el diseñador estructural para el control geométrico de la estructura.

Durante la construcción en sitio de las dovelas, frecuentemente suceden variaciones en las deformaciones consideradas en el diseño estructural, a consecuencia sobre todo de variables térmicas, cambios en la mezcla del concreto (propiedades) o errores constructivos de nivelación de la formaleta para el vaciado del concreto. Estas diferencias en las deformaciones inicialmente calculadas, al ser acumuladas en varios ciclos de avance, inducen a errores considerables, que pueden llegar a causar problemas desde los puntos de vista funcional y estético en los puentes. Por esta razón, el control de las deformaciones, establecido como una metodología durante el avance de la construcción, es primordial para obtener buenos resultados en la estructura final.

ANÁLISIS DE LAS DEFORMACIONES

Durante las fases isostática e hiperestática de la construcción de estos puentes, las deformaciones son causadas principalmente por las siguientes variables:

- Peso propio de las dovelas.
- Peso de la formaleta del carro de avance.
- Peso de los materiales, equipos y personal de construcción de las dovelas.
- Preesforzado de los cables superiores de tensionamiento.
- Retiro de los carros de avance y de la carga viva de construcción.
- Eliminación de los apoyos provisionales o del empotramiento provisional de las dovelas sobre pilas.
- Tensionamiento de los cables de continuidad o cables de solidarización.

- Colocación de las cargas muertas adicionales y cargas vivas del tráfico.
- Efectos reológicos de los materiales.
- Rigidez de la formaleta.

Adicionalmente, las deformaciones que pueden ocurrir en la infraestructura (pilas y estribos) se deben tener en cuenta para efectos del mantenimiento de la geometría vial inicial proyectada y la durabilidad de las juntas de aproximación.

CÁLCULO DE LAS DEFORMACIONES

La deflexión en el centro de las luces es, generalmente, la de mayor interés. Por lo anterior, las estimaciones de las deformaciones finales en el centro de luz, bajo la acción de las cargas muertas totales y carga viva, son necesarias para asegurar la capacidad de servicio del puente.

Para el análisis de las deformaciones de los puentes se realizaron modelos con el programa de análisis estructural Midas Civil (ref. 16), el cual permite hacer el cálculo detallado de los esfuerzos y deformaciones en este tipo de estructuras, con un análisis por etapas, teniendo en cuenta la geometría real de la estructura, la variación en el tiempo de los materiales y las cargas de construcción asignadas, incluyendo el cálculo completo de las fuerzas del preesforzado interno, obteniendo resultados precisos en cualquier punto de la estructura y en cada etapa de la construcción.

DIAGRAMA DE CAMBER

El diagrama de Camber es igual a la deformación total debida a la carga muerta más una pequeña porción de la deformación dada por la carga viva de diseño y por el gradiente de temperatura (ref. 6). También se incluyen las deflexiones por el flujo plástico del concreto, las cuales son equilibradas en un tiempo desde el momento de la construcción hasta aproximadamente la mitad de la vida útil del puente.

En el caso de los puentes construidos en sitio por voladizos sucesivos, el diagrama de Camber proporciona las contraflechas requeridas en cada junta entre las dovelas, para asegurar el perfil de diseño del puente.

Es muy importante darse cuenta de que en ningún momento de la construcción el perfil que tiene el voladizo coincide con la curva del diagrama de Camber.

Cabe hacer claridad sobre esto, ya que la tendencia natural es a construir el voladizo, nivelando la formaleta con la variación requerida para hacer que la nariz caiga exactamente en el diagrama de Camber en cada etapa constructiva. Con esta inadecuada utilización del diagrama, el puente queda construido con una indeseable doble curvatura, particularmente hacia el extremo del voladizo, y cuando se descubre el error por lo general es demasiado tarde para poner en práctica las medidas correctivas, debido a la forma final.

CONTROL GEOMÉTRICO

El control geométrico de los puentes por voladizos sucesivos se puede diferenciar en dos tipos, según el tiempo de ejecución del procedimiento: el control durante la construcción, a corto plazo, y el control durante el funcionamiento, a largo plazo.

En el caso de voladizos construidos en sitio con carro de avance, el control de las deformaciones o control geométrico de las estructuras se realiza tanto en planta, con las coordenadas de los bordes, como en el perfil de éstas, controlando las deflexiones verticales.

Dichas deflexiones se deben controlar en este tipo de puentes, durante la construcción (a corto plazo), para obtener los niveles de diseño proyectados en las juntas de construcción entre dovelas, dados por el diseño geométrico vial, además de un diseño final seguro y funcional de la estructura. Por lo tanto, este control de la geometría, durante la construcción, es indispensable, necesario y recomendable plantearlo en las normas de diseño estructural como un protocolo de seguimiento, de manera que se construyan estructuras de puentes con un control de calidad esencial. En el caso de los puentes analizados, las comparaciones de las deflexiones teóricas y reales se hacen a corto plazo, de acuerdo con el control geométrico ejecutado durante la construcción de las estructuras.

El control geométrico a corto plazo en este tipo de estructuras debe ser estricto, principalmente por las siguientes consideraciones:

- Finalizar la construcción de la estructura con las contraflechas de diseño requeridas para un buen funcionamiento de ésta, durante su vida útil.
- Obtener la rasante proyectada en los diseños, evitando dejar hundimientos en la calzada que perjudiquen

la comodidad de los conductores o den una mala apariencia visual de la estructura terminada.

- Asegurar el encuentro de los dos voladizos en el espacio, al unirlos con la dovela central, de acuerdo con la planificación de las coordenadas previstas en el proyecto, para evitar, en caso contrario, la inducción de esfuerzos adicionales y deformaciones no previstos en la estructura, al recurrir a correcciones con gatos, contrapesos o barras de tensionamiento.

Por lo anterior, se recomienda prever en el costo inicial de este tipo de proyectos el control geométrico, con un seguimiento topográfico de todas las juntas entre las dovelas durante el proceso de construcción, como mínimo en las siguientes actividades principales de cada ciclo de avance:

- Luego de tensionar los cables de construcción.
- Antes de vaciar el concreto de cada dovela, en el momento de la nivelación de la formaleta para la ejecución de cada nuevo tramo.
- Después de vaciar el concreto de cada dovela.

Adicionalmente, el control geométrico de este tipo de estructuras durante el funcionamiento (a largo plazo) se ha venido investigando con base en el monitoreo de algunos puentes, como es el caso del trabajo presentado por Peter F. Takács (ref. 10), en el que se analizan, de manera probabilista, las bases de datos de las deformaciones observadas durante el funcionamiento a largo plazo en tres puentes de grandes luces, construidos en concreto preesforzado por voladizos sucesivos, en Noruega.

La disponibilidad de esta información es valiosa para la construcción de puentes en el futuro, puesto que las mediciones son necesarias para verificar las hipótesis de diseño y evaluar el estado de los puentes durante su vida útil. Esta información también se puede utilizar para ajustar los métodos de análisis existentes y los modelos matemáticos utilizados, así como para reducir el tiempo de diseño.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS DEFORMACIONES

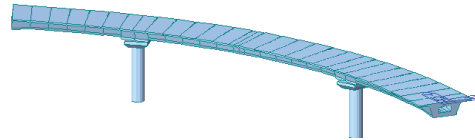
Como se mencionó anteriormente, los seis puentes estudiados, que aparecen a continuación, los diseñó el ingeniero Gregorio Rentería A., gerente de la firma Grisa, quien gentilmente suministró la información básica.

Estos puentes se construyeron en sitio con concreto preesforzado, por el método de voladizos sucesivos y tablero tipo cajón unicelular de altura constante; la

empresa encargada de la obra fue Autopistas del Café, como parte del proyecto vial Armenia - Pereira - Manizales.

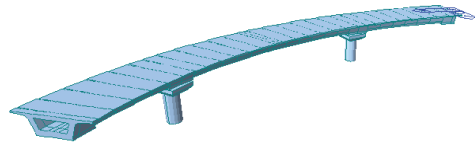
Puente Barbas

Longitud de viga cajón de 85,6 m, ancho de 10 m y área de 856 m².
Dos luces exteriores de 24,0 y 20,9 m y una luz interior de 40,7 m.



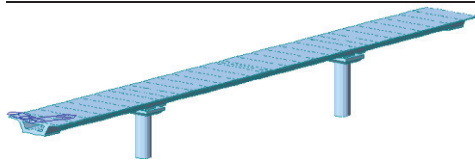
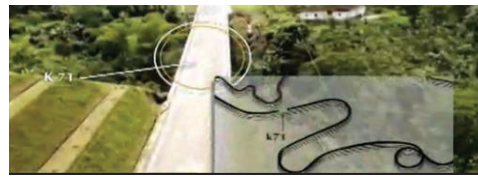
Puente Bolillo

Longitud de viga cajón de 90,24 m, ancho de 10 m y área de 902,4 m².
Dos luces exteriores de 23,25 y 17,05 m, y una luz interior de 40,7 m.



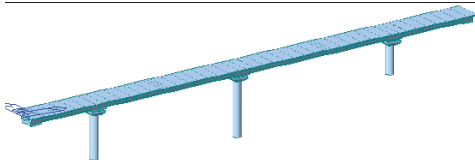
Puente N.º 71

Longitud de viga cajón de 91,80 m, ancho de 10 m y área de 918 m².
Dos luces exteriores de 24 m y una luz interior de 43,8 m.



Puente N.º 76

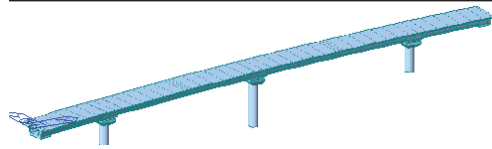
Longitud de viga cajón de 143,34 m, ancho de 10 m y área de 1433,4 m².
Dos luces exteriores de 20,15 y 23,25 m y dos luces interiores de 43,80 y 46,90 m.



Puente N.º 87

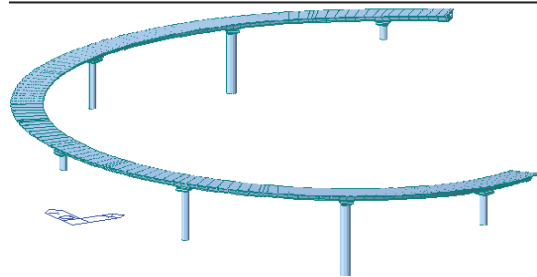
Longitud de viga cajón de 137,14 m, ancho de 10 m y área de 1371,4 m².

Dos luces exteriores de 20,15 y dos luces interiores de 43,80 m.

**Viaducto Helicoidal**

Longitud de viga cajón de 403 m, ancho de 10 m y área de 4030 m².

Dos luces exteriores de 23,25 y 20,15, siete luces interiores de 50,50 m y una de 47,4 m.



Los resultados de las deflexiones obtenidas de los modelos de cálculo de los puentes estudiados se comparan con los deltas de deformación verticales, que resultan de la diferencia entre las cotas registradas en las bases de datos, tomadas en el control topográfico durante el proceso constructivo, y las cotas de la rasante de diseño de los puentes. Estos resultados se deben comparar en cada ciclo de avance y en las tres actividades relevantes para el control de deformaciones, anteriormente mencionadas.

Con los valores de las deflexiones totales calculadas en los modelos de los puentes se obtiene una pirámide de avance horizontal con las deflexiones en cada junta entre dovelas, durante la construcción de los voladizos hasta la unión con la dovela de cierre y a largo plazo. Las deformaciones totales calculadas con signo contrario indican los valores de las contraflechas o del diagrama de Camber, los cuales se van disminuyendo en cada junta durante el avance, hasta llegar a los valores de contrafle-

cha esperados al final de la construcción a largo plazo (10.000 días - 30 años aproximadamente, después del cierre de los voladizos y el tensionamiento de los cables de continuidad inferiores). Las contraflechas finales definen la rasante de diseño estructural calculada para asumir las deflexiones verticales adicionales, causadas por las cargas posteriores, por efectos de temperatura y por un 50 % de la carga viva vehicular (en éstas, no se ha incluido la deflexión propia de los carros de avance utilizados).

Adicionalmente, con la base de datos registrados en obra se hace un resumen de las deflexiones durante las fases de construcción, expresado también como una pirámide de avance horizontal.

A continuación se presentan las gráficas de comparación de las deflexiones verticales calculadas (teóricas) y los deltas de cotas registrados en obra (reales), para las actividades relevantes en cada etapa constructiva y en todas las juntas entre dovelas del puente Barbas.

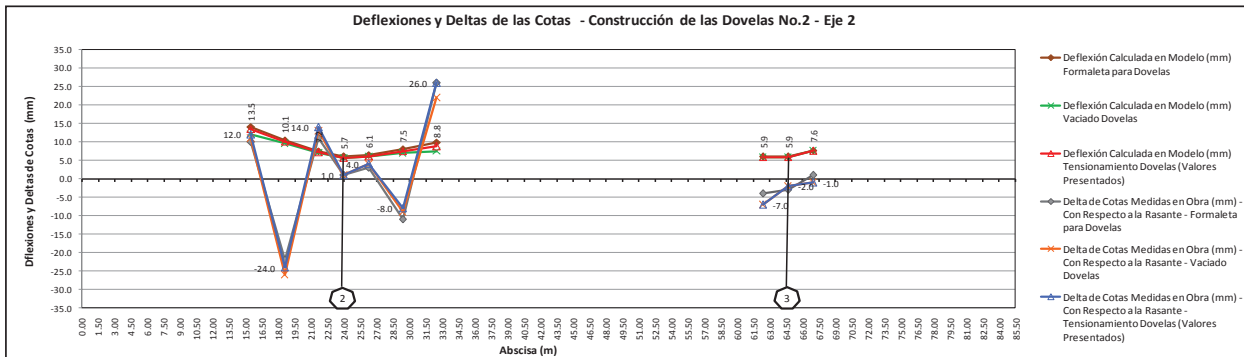


Figura 4. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 1 del puente Barbas.

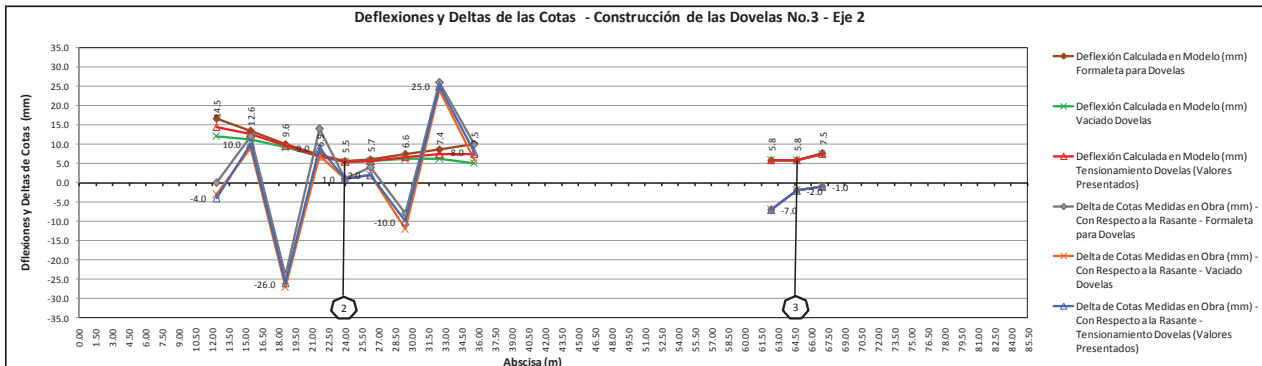


Figura 5. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 2 del puente Barbas.

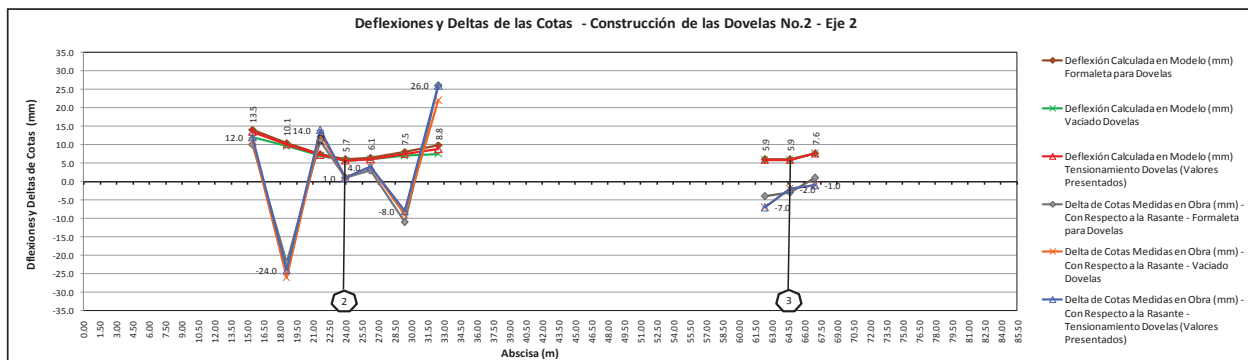


Figura 6. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 3 del puente Barbas.

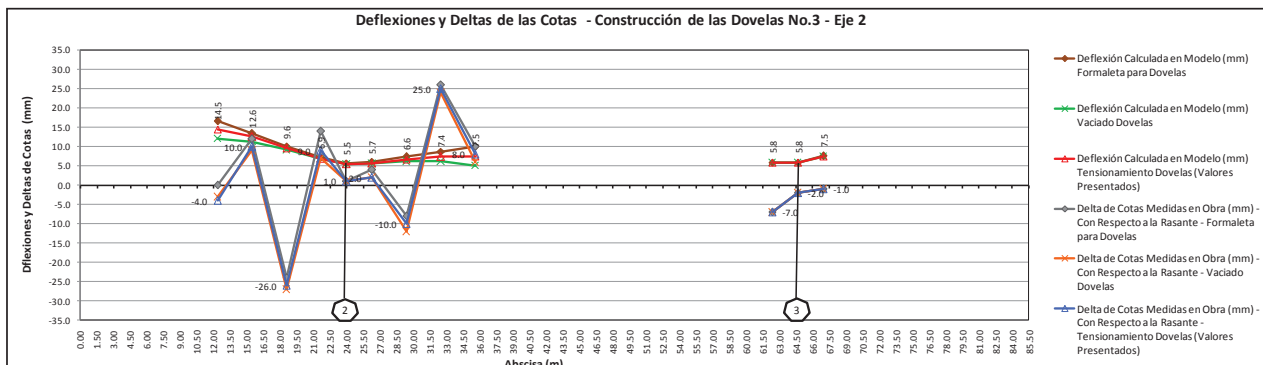


Figura 7. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 4 del puente Barbas.

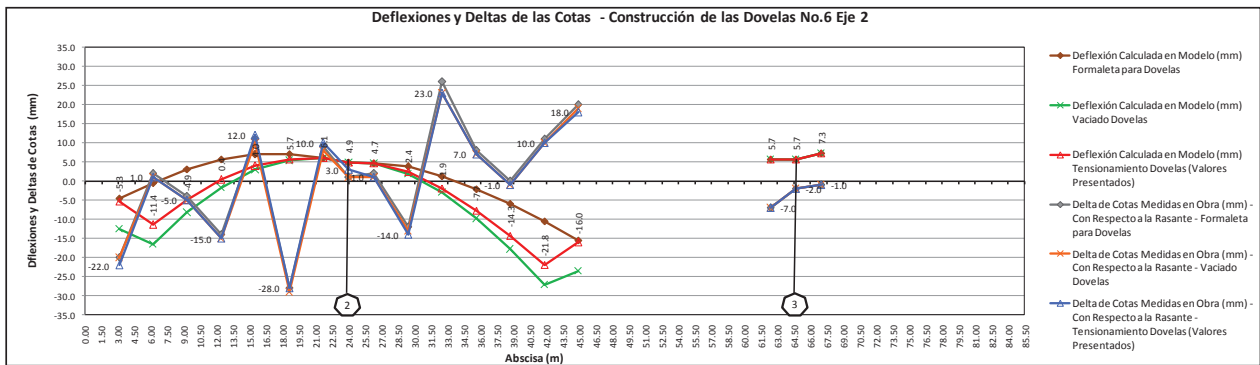


Figura 8. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 5 del puente Barbas.

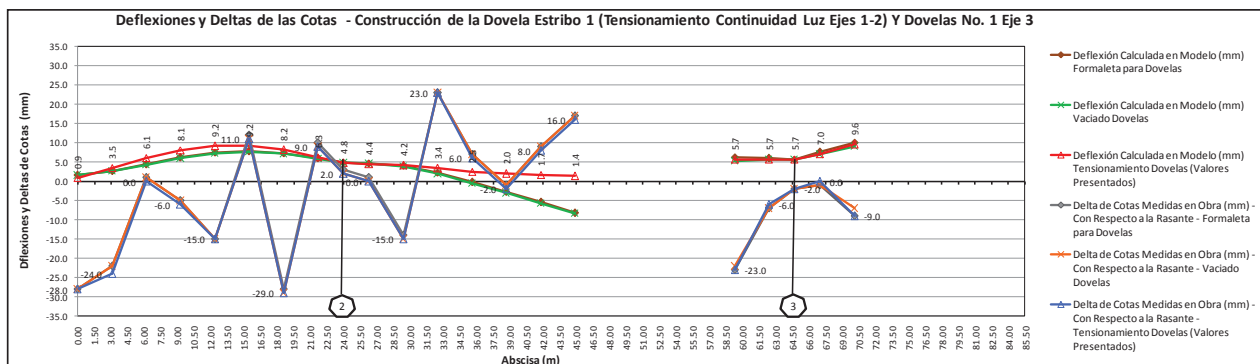


Figura 9. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 6 del puente Barbas.

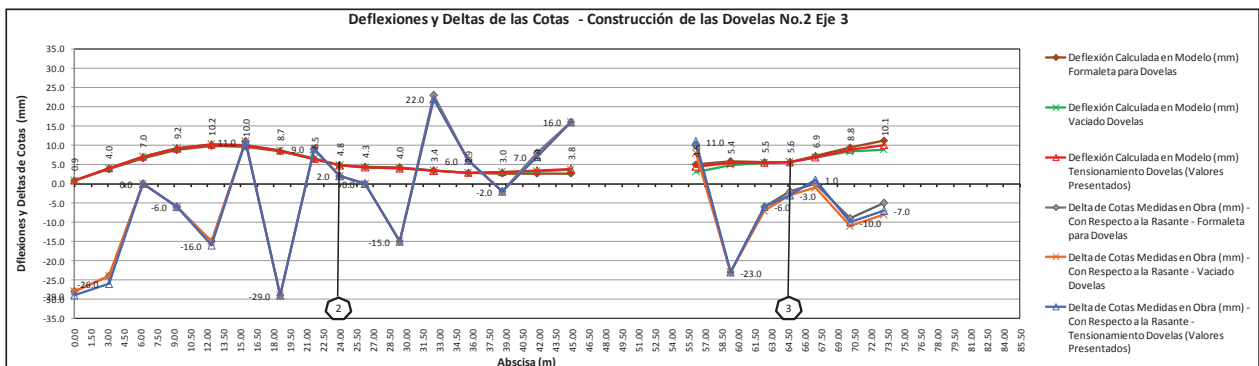


Figura 10. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 7 del puente Barbas.

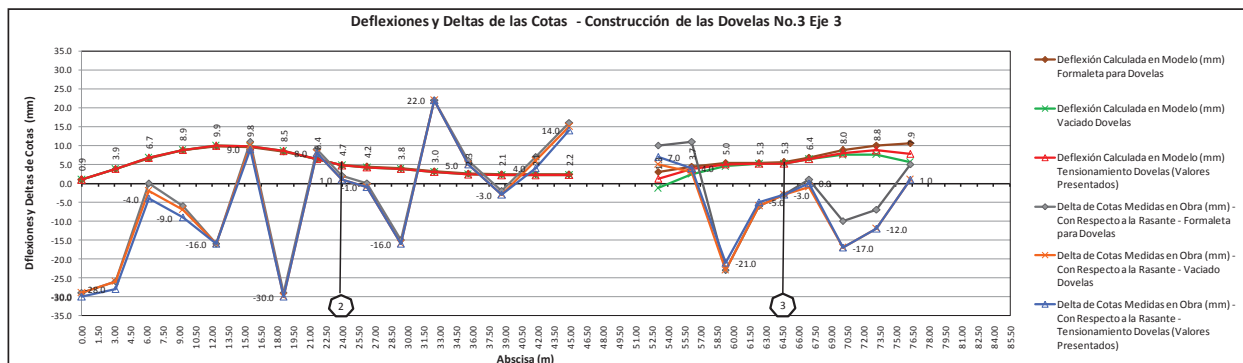


Figura 11. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 8 del puente Barbas.

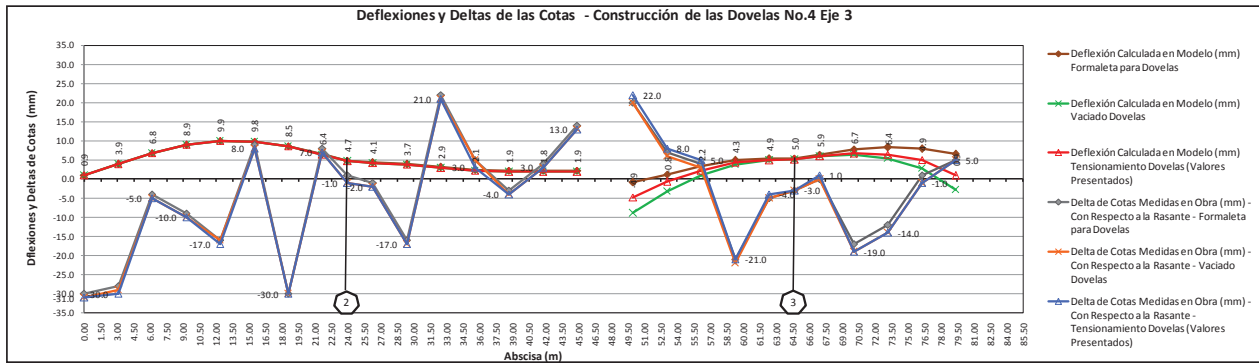


Figura 12. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 9 del puente Barbas.

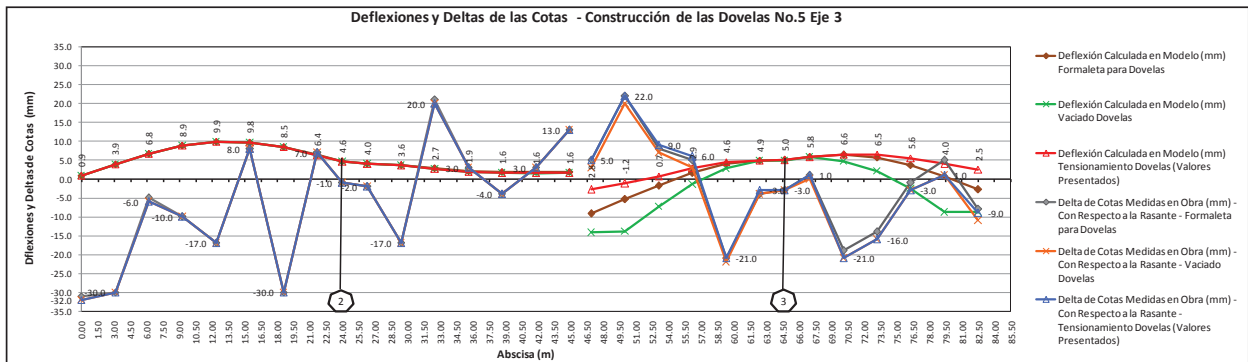


Figura 13. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 10 del puente Barbas.

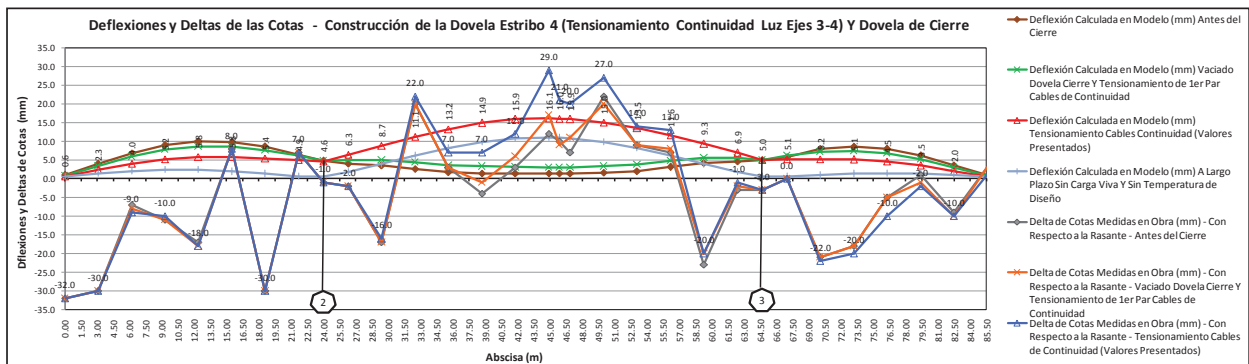


Figura 14. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Etapa 11 del puente Barbas.

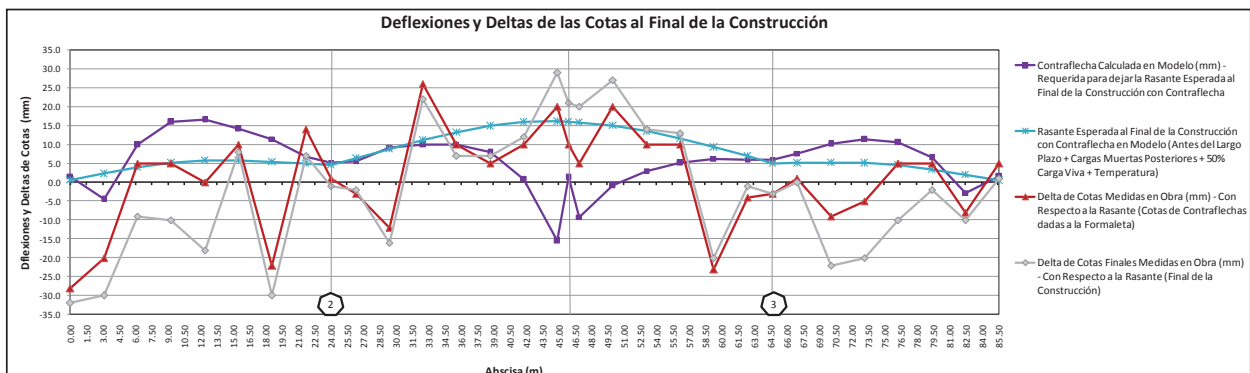


Figura 15. Deflexiones teóricas contra deltas reales. Final de la construcción del puente Barbas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la comparación de las deflexiones teóricas y reales de los seis puentes analizados se puede concluir, en general, que estas estructuras presentan:

Una tendencia a sufrir contraflechas en los voladizos hacia el centro de las luces, durante el proceso de construcción, siendo mayores en la etapa en la que se construye una dovela adicional, asimétrica, al final del voladizo lateral, que queda apoyada sobre el estribo; además, se eliminan las cargas temporales de construcción y se produce el efecto del tensionamiento de los cables inferiores en la viga cajón, la cual presenta una sección optimizada de las dovelas.

Probables giros en la unión temporal de las pilas con la superestructura, durante la construcción de las últimas dovelas cinco y seis, por diferencias en las cargas de los voladizos e incrementos en los momentos de giro, por la inclinación longitudinal del tablero, dada por la pendiente vial del 7 % o por errores de colocación de la formaleta.

En los puentes curvos, incrementos en las deflexiones calculadas por efecto de la deformación de las pilas hacia el centro del radio de la curvatura del voladizo, debido al momento de torsión generado por las excentricidades entre los centros de gravedad de las cargas de cada dovela y el eje de la pila, como por ejemplo en el Viaducto Helicoidal, en el que las deflexiones totales obtenidas fueron de $-7,7$ y $7,0$ cm en los ejes 4 y 7, entre las cotas definitivas de construcción y la rasante dada por el diseño geométrico vial.

En algunos casos, deformaciones adicionales por efectos reológicos durante el tiempo de espera de la construcción de un voladizo con respecto al otro simétrico y opuesto en una misma luz, hasta llegar al cierre.

Se pudo observar que el perfil final de los puentes tiene variaciones de nivel indeseadas en toda la longitud de la viga cajón de los tableros, especialmente hacia los centros de las luces, por la inadecuada utilización del diagrama de Camber y por correcciones bruscas realizadas en dovelas consecutivas, pero en general presentan diferencias moderadas entre las deflexiones reales y teóricas comparadas, mostrando las mismas tendencias de comportamiento desde el posicionamiento de la formaleta hasta el final de la construcción, con respecto a las deflexiones teóricas calculadas.

De acuerdo con la base de datos de los registros topográficos, recopilados en las obras de los seis puentes

analizados, se puede estimar que este registro pudo tener errores de precisión de hasta ± 40 mm, debido probablemente a un mal posicionamiento de los equipos —a pesar de las consideraciones previstas para evitar estos errores—, a problemas de registro durante la toma de los datos o a posibles movimientos de la superestructura durante el proceso.

Se considera obligatorio proporcionar al constructor, en los planos, la información de las contraflechas calculadas al final del proceso constructivo, para la correcta ejecución de este tipo de estructuras, considerando todas las etapas y los tiempos de ejecución establecidos en la programación de obra.

Los puentes de concreto preesforzado, construidos en sitio mediante voladizos sucesivos, se deberían diseñar de manera que se eviten los efectos estructurales y estéticos indeseados que provocan las deformaciones; por esto la tendencia mundial se inclina hacia el diseño de estructuras basado en los límites de deformaciones, con la utilización de los métodos probabilísticos en los cuales el objetivo del análisis es estimar las propiedades estadísticas de las respuestas estructurales. Para el análisis de deformación probabilístico se requieren los registros de deformaciones de una gran cantidad de puentes, por lo que se recomienda hacer el seguimiento de más estructuras y el registro de las mediciones de sus deformaciones, para conseguir una buena base de datos que permita evaluar estadísticamente el comportamiento de este tipo de estructuras.

Se debe ejecutar de manera rigurosa un control geométrico en este tipo de estructuras, principalmente, para finalizar su construcción con las contraflechas de diseño, haciendo una adecuada utilización del diagrama de Camber, obtener la rasante proyectada en los diseños, evitando dejar hundimientos en la calzada que perjudiquen la comodidad de los conductores o una mala apariencia visual de la estructura terminada, y para asegurar el encuentro de los dos voladizos en el espacio al unirlos con la dovela central, de acuerdo con la planificación de las coordenadas previstas en el proyecto.

Se recomienda el uso de un protocolo para el control de deformaciones y una planilla de seguimiento, los cuales permitan el registro topográfico de la geometría de diseño y de las deformaciones presentadas durante las obras de este tipo de puentes.

Se considera necesario incluir en el Código Colombiano de Diseño de Puentes la normativa para el cálculo

de puentes por voladizos sucesivos y el control de las deformaciones como parte fundamental del proceso de construcción de este tipo de estructuras, teniendo en cuenta que es una de las tipologías de puentes más utilizadas en el país.

REFERENCIAS

1. Mathivat, J. (1980). *Construcción de puentes de hormigón pretensado por voladizos sucesivos* (1.ª ed.). Barcelona: Editores Técnicos Asociados S.A., 116 pp.
2. Podolny, Jr., W. & Muller, J. (1982). *Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges*. A Wiley-Interscience Publication, 482 pp.
3. Fernández, C., Manterola, J. & Fernández, L. (julio de 1990). Construcción de puentes por voladizos sucesivos mediante dovelas prefabricadas. *Revista de Obras Públicas*, 3063, 715-730.
4. Hewson, N. (2006). *Prestressed Concrete Bridges: Design and Construction*. Thomas Telford Books, 9 pp.
5. Prestressed Concrete Institute and Post Tensioning Institute (1978). *Precast Segmental Box Girder Bridge Manual*. USA, p. 1.
6. Menn, C. (1927). *Prestressed Concrete Bridges*. Stahlbetonbrücken, 337 pp.
7. González Cuevas, Ó. (2003). *Análisis estructural*. México: Limusa, 161 pp.
8. Tonias E., D. (1995). *Bridge Engineering*. McGraw-Hill, Inc. 77 pp.
9. Perdomo, M. (junio de 2011). "Estudio comparativo de puentes construidos por voladizos sucesivos". Tesis de maestría en Ingeniería Estructural y de la Construcción. Cataluña: Universidad Politécnica de Cataluña, 27 pp.
10. Takács, P. (March 2002). *Deformations in Concrete Cantilever Bridges: Observations and Theoretical Modelling*. Doctoral Thesis - Department of Structural Engineering, The Norwegian University of Science and Technology Trondheim, 105 pp.
11. Chio Chio, G. (agosto de 2000). *Comportamiento estructural y criterios de diseño de los puentes con pretensado extradadoso* (cap. 2). Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
12. Percivati Franco, R. (s.f.). *Métodos y sistemas constructivos de puentes de hormigón de reciente utilización en la República Argentina*.
13. II Simposio Iberoamericano sobre Concreto Estructural (septiembre de 2006).
14. VV.AA. (1995). *Reflexiones sobre nuestros puentes: programa ingeniería XXI*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 91 pp.
15. www.grisacol.com Gregorio Rentería Ingenieros S.A.
16. www.midasuser.com Solución para el diseño de puentes y estructuras de obra civil.
17. Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes 1995 (CCP 200).
18. Standard Specification for Highway Bridges 2002 (Edition 17) (AASHTO).
19. Guide Specifications for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges (2.ª ed., 1999) (AASHTO)
20. American Segmental Bridge Institute – Construction Practice Seminar Geometry Control 2005.
21. Design Guide - Prestressed Concrete Bridges Built Using The Cantilever Method (Sétra) (June 2003). République Française, 153 pp.
22. Gobierno de España (Ministerio de Fomento) (2011). *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08* (5.ª ed.), pp. 245, 440, 566.
23. Precast Segmental Box Girder Bridge Manual. Post-tensioning Institute (PTI) (1978). Prestressed Concrete Institute (PCI), 62 pp.
24. Code (s.f.). Modele CEB-FIP Pour Les Structures en Béton (CEB-FIP). Comité euro-international du Béton.
25. ACI 209R-92 (Reapproved 1997). Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures.

Análisis de la viabilidad del aprovechamiento del acero contenido en los residuos cortopunzantes provenientes de los establecimientos de servicios de salud o similares en la ciudad de Bogotá

Feasibility analysis for recovering steel from sharps waste generated in healthcare and similar establishments in Bogotá

DAVID RICARDO LÓPEZ GUZMÁN¹ - MARÍA CAROLINA ROMERO PEREIRA²

1. Ingeniero ambiental de la Universidad El Bosque. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniera civil de la Pontificia Universidad Javeriana. M.Sc. (e) en Ingeniería Ambiental y Gerencia de Proyectos de University of Leeds, UK. Profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

david.lopez-gu@mail.escuelaing.edu.co - maria.romerop@escuelaing.edu.co

Recibido: 12/11/2016 Aceptado: 10/01/2017

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

Resumen

En este artículo se analiza la viabilidad del aprovechamiento del acero que contienen los residuos hospitalarios y similares (RHS) generados por los establecimientos de servicios de salud o similares (ESS) vigilados por la Secretaría Distrital de Salud (SDS) de Bogotá, considerando aspectos técnicos, económicos y legales. Para esto, se hizo un diagnóstico sobre la gestión integral de RHS (GIRHS) en Bogotá, se analizó la normativa aplicable en Colombia y se revisaron las tecnologías disponibles a escala local para aprovechar el acero que contienen los RHS de tipo cortopunzante (RHS-C). A partir de esto se analizaron varias opciones para el tratamiento de los RHS-C generados en Bogotá y para el aprovechamiento del acero contenido en éstos, con el fin de comparar el escenario actual de la GIRHS con un escenario propuesto basado en su aprovechamiento. Como resultado se encontró que el aprovechamiento del acero que contienen los RHS-C generados por los ESS de Bogotá es viable.

Palabras claves: residuos hospitalarios, residuos cortopunzantes, aprovechamiento, gestión mejorada de residuos sólidos.

Abstract

This article analyses the feasibility of recovering metal from sharps contained in Healthcare Waste (HCW) generated by health facilities in Bogotá, considering technological, economical, and legal matters. A diagnosis of current management was made, as well as an analysis of legal constraints in Colombia and a revision of treatment technologies available in Colombia for sharps contained in HCW (HCW-S) in Bogotá. Different options for the treatment and recovery of metal contained in HCW-S were examined, selecting an option for comparing costs with current management. As a result, it was found that it is feasible to recover metal contained in sharps from HCW in Bogotá.

Keywords: feasibility, healthcare waste, medical sharps waste, treatment, recovery, improved solid waste management.

INTRODUCCIÓN

Se estima que en Bogotá se producen anualmente unas 10.000 t de RHS, de los cuales más de 1000 t son de tipo cortopunzante (RHS-C)¹. Estos RHS son dispuestos en un relleno y en una celda de seguridad, para lo cual la normativa colombiana exige que sean previamente tratados, eliminando sus características de peligrosidad. Hoy, en Bogotá los RHS son sometidos a tratamiento por termodestrucción (incineración) o desactivación de alta eficiencia (esterilización), para llevarlos a los sitios de disposición final autorizados para este fin.

La gestión actual de RHS en Bogotá consiste en su adecuación para llevar disposición final cumpliendo los estándares legales, lo cual conlleva costos económicos y ambientales. Un escenario de aprovechamiento del acero contenido en los RHS podría mejorar el esquema actual de la GIRHS, considerando el orden de preferencia de las alternativas contempladas en la jerarquía de opciones ambientales propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por su sigla en inglés), en donde el reciclaje es preferido antes de la disposición final por cuanto implica menores costos ambientales, económicos y sociales.

Así, en los sitios de disposición final para este tipo de residuos se está disponiendo material que se podría aprovechar, contrarrestando los costos del tratamiento requerido –aun para su disposición final– y probablemente prolongando la vida útil de los sitios de disposición de los RHS.

En este artículo se presenta un análisis de la viabilidad del aprovechamiento del acero que contienen los residuos cortopunzantes generados en la ciudad de Bogotá, considerando la normativa vigente, la existencia de tecnologías para el procesamiento y recuperación del metal y los costos potenciales asociados.

RESULTADOS

Diagnóstico de la GIRHS en la ciudad de Bogotá

Se estima que en Bogotá se trataron cerca de 10.246 t² de RHS en el 2013, de los cuales 1.640 t (16 %) se

sometieron a termodestrucción; el 84 % restante (8.606 t) se trató mediante desactivación de alta eficiencia o esterilización³.

En la actualidad, el único proveedor autorizado en la ciudad de Bogotá para realizar la recolección, transporte, tratamiento y disposición final de RHS es Ecocapital S.A. ESP, mediante la concesión 186 de 2011. Esta empresa hace el proceso de desactivación de alta eficiencia en sus instalaciones, mientras que de la termodestrucción o incineración se encargan dos operadores: Tecniamsa S.A. ESP y Prosarc S.A.

Las cenizas de los RHS son tratadas por termodestrucción y dispuestas en un relleno de seguridad localizado en el Parque Tecnológico Ambiental de La Sabana (PTALS), del municipio de Mosquera. Los demás RHS son tratados mediante desactivación de alta eficiencia y dispuestos en una celda de seguridad del Relleno Sanitario de Doña Juana (RSDJ).

Composición de RHS en Bogotá

De acuerdo con los registros de la SDS en Bogotá se generan anualmente alrededor de 1000 t de RHS-C (tabla 1).

Tabla 1

Generación de RHS-C en el periodo 2010-2014 por los establecimientos vigilados por la SDS de Bogotá

Cantidad generada (t)				
2010	2011	2012	2013	2014
504,9	542,2	610	1028,1	996,8

* Incluye el peso del recipiente.

** No incluye los residuos de animales debido a que la SDS no solicita esta información a los ESS.

Fuente: Datos suministrados por la SDS de Bogotá. Elaboración propia (2016).

Cerca de 106,7 t de los RHS-C son tratados por termodestrucción, mientras que otras 921,4 t son tratadas mediante desactivación de alta eficiencia.

La masa de los RHS sometidos a termodestrucción se reduce considerablemente, debido a que gran parte de los RHS sometidos a este proceso se gasifica. De

1. Ecocapital S.A. ESP Ambiental. Recuperado el 19 de enero de 2016 del sitio web de Ecocapital (www.ecocapital-int.com).
2. *Ibíd.*

3. Ecocapital S.A. ESP. Ecocapital [diapositivas]. Bogotá: Ecocapital S.A. ESP. 51 diapositivas en color.

acuerdo con el *Estudio de impacto ambiental para la operación de transporte, recolección, tratamiento y disposición de residuos peligrosos y no peligrosos*, realizado por Prosarc (2015), un 49 % de los residuos cortopunzantes cambia a estado gaseoso durante el proceso de termodestrucción, dado que su composición comprende un 18 % de carbono (C), 3 % de hidrógeno (H), 2 % de oxígeno (O) y 26 % de humedad⁴.

Estimación del acero contenido en los RHS-C generados en Bogotá

Tomando en cuenta que la fracción metálica y de vidrio de los RHS-C se mantiene en estado sólido al pasar por el proceso de termodestrucción⁵, para estimar la cantidad de acero y vidrio contenida en los RHS-C se empleó la ecuación 1, utilizada por Prosarc en la elaboración del estudio de impacto ambiental mencionado.

Ecuación 1. Estimación de cantidad de vidrio y acero contenida en los RHS-C

$$R_{(A+V)_n} = 0,51 \times R_{C_n}$$

Fuente: Elaboración propia (2016), tomando como referencia Prosarc S.A. ESP⁶.

Donde:

- R_{A+V} : cantidad de acero y vidrio contenida en los RHS-C, correspondientes al año n (t).
 R_{C_n} : cantidad de RHS-C correspondientes al año n (t).

Aplicando la ecuación 1 a los datos de la tabla 1, se estimó la fracción de acero y vidrio contenida en los RHS-C generados en Bogotá entre los años 2010 y 2013, obteniendo los resultados de la tabla 2.

- Prosarc S.A. ESP (2015). *Estudio de impacto ambiental para la operación de transporte, recolección, tratamiento y disposición de residuos peligrosos y no peligrosos*. Mosquera, Colombia: Prosarc S.A. ESP.
- David Moreno (2014). Área de tratamiento de Ecocapital S.A. ESP. Bogotá, Colombia. Observación inédita.
- Prosarc S.A. ESP (2015). *Estudio de impacto ambiental para la operación de transporte, recolección, tratamiento y disposición de residuos peligrosos y no peligrosos*. Mosquera, Colombia: Prosarc S.A. ESP.

Tabla 2

Estimación de la fracción de acero y vidrio contenida en los RHS-C generados en el periodo 2010-2013 en la ciudad de Bogotá

Cantidad residuos acero y vidrio contenida en los RHS-C (t)			
2010	2011	2012	2013
257,5	276,5	311,1	524,3

Fuente: Elaboración propia (2016), a partir de datos suministrados por la SDS de Bogotá.

Debido a que no se cuenta con cálculos de la proporción de acero inoxidable, la fracción de este material se estimó utilizando la ecuación 2, partiendo del volumen de llenado del recipiente de segregación en la fuente y embalaje de residuos cortopunzantes (denominado guardián). Esto equivale a la suma del volumen de elementos de acero (agujas, escalpelos, lancetas, etc.), el volumen de elementos de plástico (jeringas, citocepillos, etc.), volumen de elementos de vidrio (ampolletas, laminillas portaobjetos y cubreobjetos, vidriería rota, etc.) y otros elementos (hisopos).

Ecuación 2. Volumen de RHS-C contenidos en el guardián

$$V_R = V_V + V_A + V_P + V_O$$

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Donde:

- V_R : volumen ocupado por los RHS cortopunzantes dentro del guardián (no puede superar tres cuartas partes de la capacidad del guardián).
 V_V : volumen ocupado por los elementos de vidrio dentro del guardián.
 V_A : volumen ocupado por los elementos de acero dentro del guardián.
 V_P : volumen ocupado por los elementos de plástico dentro del guardián.
 V_O : volumen ocupado por otros elementos dentro del guardián.

Según la Resolución 1164 de 2002, los guardianes deben tener una capacidad que no supere los 2 L, una resistencia a la punción o cortadura superior a 12,5 N y no deben llenarse más tres cuartas partes de su capacidad, por lo que se estima que el valor máximo de V_R es:

$$V_R = \frac{3}{4}(2L) = 1,5 L = 0,0015 m^3$$

Los guardianes de polipropileno con capacidad de 2 L que se encuentran en el comercio tienen un peso de aproximadamente 180 g (0,2 kg)⁷. El volumen ocupado por el residuo puede estimarse mediante la relación entre su masa y su peso específico, por lo que el volumen de RHS-C almacenados en el guardián a partir de su masa y peso específico puede estimarse empleando la ecuación 3:

Ecuación 3. Estimación del volumen de RHS-C almacenados en el guardián

$$V = \frac{m}{\gamma} \rightarrow V_R = \frac{m_V}{\gamma_V} + \frac{m_A}{\gamma_A} + \frac{m_P}{\gamma_P} + \frac{m_O}{\gamma_O}$$

Fuente: Elaboración propia (2016).

Para estimar la masa de cada componente de los RHS dentro del guardián (acero, vidrio, plástico y otros elementos) los pesos específicos se asumieron de acuerdo con Tchobanoglous et al. (1994)⁸. Para el acero se asumió el peso específico de “Otros metales” y para otros elementos el de “Madera”, puesto que este componente se constituye de hisopos, cuya composición es de madera en su mayor proporción; el algodón constituye una proporción pequeña, omitida dentro del análisis.

Para obtener la proporción de acero contenido en los RHS-C, se realizaron iteraciones utilizando la ecuación 2 y los valores mínimo, promedio y máximo de los pesos específicos de los componentes de los residuos cortopunzantes. Se asumió un V_R igual a 0,0015 m³ y que la suma de la masa de acero y vidrio corresponde a un 51 % de la masa total de los residuos cortopunzantes (incluyendo el guardián).

Como resultado, la proporción en masa del acero oscila entre 24,7 y 25,6 % con respecto al peso de un guardián lleno; y entre 48,4 y 50,1 % con respecto a la

cantidad de cenizas resultantes de la termodestrucción del guardián lleno.

En cuanto a la estimación de la cantidad de acero dispuesta en el RSDJ, se tomaron como referencia los datos del año 2013, obteniendo un estimado de 921,4 t de RHS-C sometidos a desactivación de alta eficiencia con autoclave; la cantidad de acero se estima entre 228,9 y 235,4 t (tabla 3).

Tabla 3

Estimación de acero contenido en RHS-C dispuestos en celda de seguridad del RSDJ (2013)

RHS-C dispuestos (t)	Acero + vidrio dispuestos (t)	Estimación de acero (t)		
		Mín. (48,7 %)	Med. (49,2 %)	Máx. (50,1 %)
921,4	470	228,9	231,2	235,4

Fuente: Datos suministrados por Ecocapital S.A. ESP y SDS. Elaboración propia (2016).

A partir de los porcentajes obtenidos de las iteraciones mencionadas anteriormente y la cantidad de RHS-C generada en el año 2013, el balance de masa de los RHS-C provenientes de los ESS de Bogotá se resume en la figura siguiente (figura 1).

En cuanto a la caracterización del acero contenido en los RHS-C, los elementos metálicos que predominan están hechos de acero austenítico (acero con resistencia a la corrosión en una amplia gama de ambientes corrosivos, dúctil y maleable, resistente a altas temperaturas), cuyas aleaciones están basadas en los estándares establecidos en las normas 304 y 316 del Instituto Americano del Hierro y el Acero (AISI).

Al someter estos elementos a temperaturas superiores a los 850 °C, las cenizas resultantes ya no presentan peligrosidad por riesgo biológico, según los resultados de las pruebas de patogenicidad aplicadas a las cenizas⁹.

Sitios de disposición final de los RHS de Bogotá

La celda de seguridad del RSDJ se encuentra operando desde el año 1998 y tiene una superficie de 1,5 ha

7. Maxisalud. Recolectores de cortopunzantes. Recuperado el 4 de enero de 2016, del sitio web de Maxisalud (www.maxisalud.co).

8. G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil (1994). Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues. Nueva York: McGraw Hill, p. 82.

9. Instituto de Higiene Ambiental Ltda. (Ihaltda) (2010). Informe de caracterización de residuos: ceniza. Prueba Cretip/TCLP Ecocapital. Bogotá: Ihaltda.

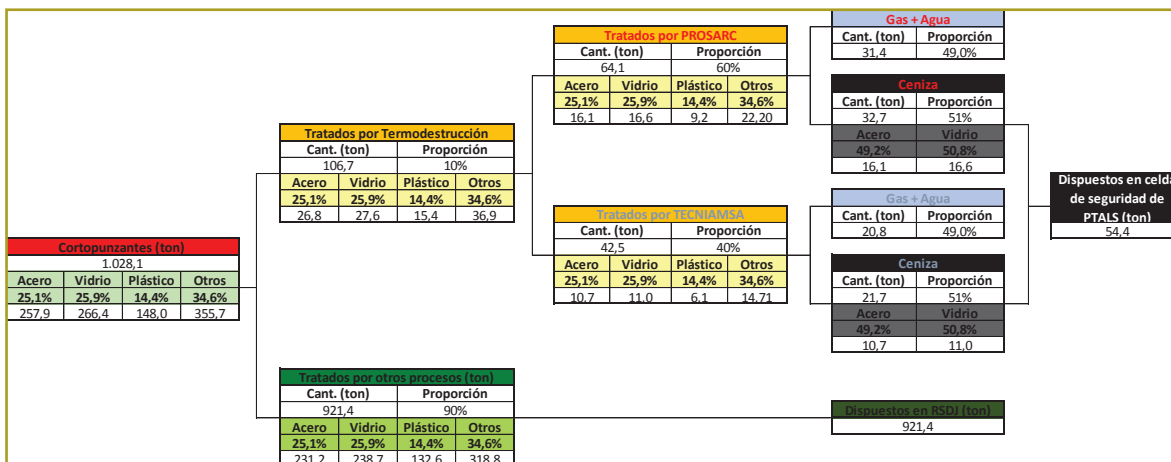


Figura 1. Balance de masa de residuos cortopunzantes generados en los ESS de Bogotá en el año 2013.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

proyectada para almacenar 28.406 t. Desde el 2006, una parte de los RHS se ha venido disponiendo directamente en las celdas de residuos convencionales o no aprovechables, como residuos esterilizados¹⁰. Por otro lado, la celda de seguridad operada por PTALS, ubicada en el municipio de Mosquera, tiene una capacidad de 250.000 t y una vida útil de tres años, aproximadamente¹⁰.

Marco normativo de la GIRHS en Bogotá

- **Generación en la fuente.** De acuerdo con lo establecido en la normativa aplicable vigente en Colombia (Resolución 1164 de 2002, Decreto Único Reglamentario (DUR) 1076 de 2015 y Decreto 351 de 2014), todo residuo generado en las ESS se considera infeccioso si se mezcla con residuos infecciosos; por tal razón, debe garantizarse su separación en la fuente.
- **Almacenamiento y embalaje.** Los recipientes en los que deben segregarse, almacenarse y entregarse los RHS-C deben estar hechos de polipropileno (PP), de acuerdo con el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de Residuos Hospitalarios y Similares en Colombia (MPGIRHS), adoptado mediante Resolución 1164 de 2002.

- **Transporte.** Los RHS deben ser transportados por proveedores con licencia ambiental vigente para esta actividad. En caso de que la recolección o transporte de estos residuos se realice junto con otros residuos peligrosos, el DUR 1076 de 2015 establece que no se deben movilizar en un mismo vehículo si son incompatibles.
- **Aprovechamiento.** Según la Resolución 0482 de 2009, no se podrán reciclar elementos o insumos médicos que se consideren como un residuo de carácter infeccioso. No obstante, el numeral 7.2.4.1 del MPGIRHS indica que los RHS-C podrán ser dispuestos en relleno sanitario o reciclados en plantas de fundición de metales, previa esterilización.
- **Disposición final.** El MPGIRHS establece que los residuos infecciosos biosanitarios, cortopunzantes y de animales pueden ser llevados a rellenos sanitarios, previa desactivación o esterilización de alta eficiencia. Adicionalmente, los RHS-C requieren ser triturados, ya sea para su aprovechamiento, o para su disposición final en un relleno sanitario, debido a que los operarios que manipulan estos residuos podrían estar expuestos al riesgo de sufrir lesiones.

Revisión de tecnologías disponibles

Según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), cualquier sistema de tratamiento de RHS tiene los siguientes objetivos esenciales: 1) eliminar potencial infeccioso o peligroso antes de su disposición final; 2)

10. John Bonilla (2016). Tecniamsa S.A. ESP. Mosquera. Observación inédita.

Tabla 4
Ventajas y desventajas de los tipos de tratamiento de RHS

Criterio		Tecnología y complejidad					Propósitos de la GIRHS				Propósitos de la GIRHS			Costos		
Tipo de tratamiento		Capacidad para tratamiento de volúmenes grandes de RHS	Complejidad de operación y mantenimiento	Requiere personal especializado	Requiere tratamiento preliminar	Requiere tratamiento posterior	Inactivación de patógenos eficiente	Persistencia de característica cortopunzante	Facilita separación del metal	Reducción del volumen de los RHS	Emisiones atmosféricas	Vertimientos industriales	Riesgos por manipulación de químicos o por radiaciones	Otros riesgos para la salud humana	Costos de inversión	Costos de operación y mantenimiento
Químico		D	D	V	D	D	V	D	V	D	D	D	D	D	V	V
Irradiación		D	D	D	D	D	V	D	V	D	V	V	D	D	D	D
Térmico baja temperatura	Autoclave	V	V	V	V	D	V	D	D	V	D	V	D	V	V	V
	Horno	D	V	D	V	V	D	V	D	V	D	V	V	V	V	V
Térmico de alta temperatura		V	D	D	V	V	V	V	D	V	D	V	V	D	D	D
Incandescencia		V	D	D	V	V	V	V	D	V	D	V	V	D	D	D
		V	Ventaja													
		D	Desventaja													

Fuente: Elaboración propia, 2016.

reducir el volumen de RHS; 3) volver irreconocibles o irrecuperables los RHS; 4) impedir la reutilización inadecuada de elementos reciclables de los RHS; y 5) evitar impactos al ambiente con emisiones gaseosas, descargas líquidas y sólidas.

Los tipos de tratamiento de RHS que se usan con mayor frecuencia incluyen el tratamiento químico, tratamiento por irradiación, tratamiento térmico de baja y alta temperatura e incandescencia. En la tabla anterior se presenta un resumen del análisis de las ventajas y desventajas de cada tipo de tratamiento (tabla 4).

Las tecnologías disponibles en Colombia para el aprovechamiento del acero contenido en los RHS-C se identificaron consultando con empresas a escala nacional que cuentan con instalaciones y equipos necesarios y equipos similares para el procesamiento y aprovechamiento de RHS-C.

- **Desactivación de alta eficiencia o esterilización.** Ecocapital cuenta con un equipo autoclave capaz de mantener durante un tiempo específico condiciones estables de temperatura y presión mediante vapor de agua saturada generado por una caldera. Este equipo se utiliza actualmente para tratar una parte de los RHS-C y se considera una de las tecnologías viables para el tratamiento para estos residuos debido a su capacidad, que supera las 10.000 t/año. De acuerdo con la Dirección de Asuntos Ambientales del MADS, algunos ESS realizan el tratamiento de los RHS-C por medio de autoclave, pero no se reporta cuántos y cuáles establecimientos cuentan con esos equipos.
- **Recolección y transporte.** La única empresa autorizada actualmente para transportar los RHS en Bogotá es Ecocapital, por lo cual esta firma cuenta

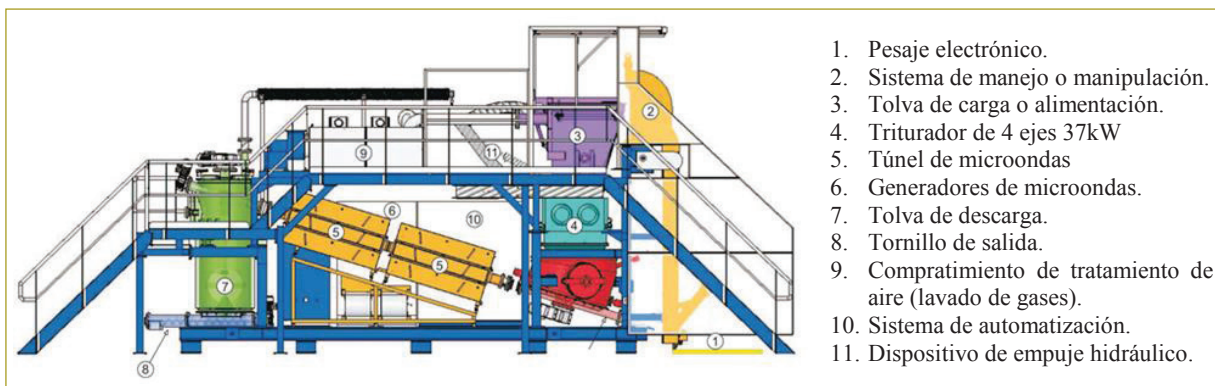


Figura 2. Proceso Ecosteryl.

Fuente: AMB Ecosteryl¹¹.

con los vehículos necesarios para realizar el transporte de estos residuos.

- **Separación.** Las empresas encontradas en Bogotá que gestionan el reciclaje de acero no cuentan con equipos especializados para separar el acero contenido en los RHS-C, puesto que solamente realizan el almacenamiento y acopio de los residuos de acero en condiciones aptas para fundirlos y reincorporarlos a la fabricación de productos de acero. No obstante, se encontró que existen empresas que cuentan con equipos de procesamiento de cables para separar el cobre mediante diferencia de densidades (gravimetría), que podrían emplearse para la trituración y separación del acero de los RHS-C. En países tales como Bélgica, Francia, Italia, Canadá y Malasia se ha implementado una tecnología denominada Ecosteryl (figura 2), que incluye los dispositivos necesarios para llevar a cabo la trituración y desactivación por microondas de los RHS. Aun cuando no se ha aplicado en Bogotá, en las ciudades de Cali y Cúcuta se plantea su implementación.
- **Aprovechamiento.** Se identificó que la planta industrial de la Siderúrgica Nacional (Sidenal) S.A., localizada en el municipio de Sogamoso (Boyacá), que cuenta con un sistema de Recuperación y Conversión Energética (RYCE) que permite la recuperación de materiales y transformación de residuos a

combustibles sintéticos empleados en los procesos de manufactura. El fin de esta planta es recuperar pequeñas fracciones de metales, separarlos para su clasificación, y mediante pirólisis transformar los compuestos orgánicos (fibras, cauchos, plásticos y biomasa), en gas, aceite y coque sintético. Esta planta alcanza una producción de 200 t/día, suficiente para procesar el acero contenido en los RHS-C generados en Bogotá.

Selección de una alternativa para el aprovechamiento del acero de los RHS-C

De acuerdo con el análisis de las tecnologías disponibles, la normativa aplicable y las ventajas y desventajas de cada tipo de procesamiento de RHS, se planteó una alternativa para el aprovechamiento del acero contenido en los RHS-C generados en la ciudad de Bogotá.

La esterilización o desactivación de alta eficiencia (autoclave de calor húmedo), a pesar de que se encuentra disponible en las instalaciones de Ecocapital, requiere dos operaciones unitarias (trituración y separación electromagnética) para recuperar el acero de los residuos cortopunzantes. La unidad de trituración especial para este tipo de residuos no se encuentra en el mercado a escala nacional.

En cuanto a la hidrólisis alcalina, pese a que se encuentran estudios sobre sus ventajas técnicas, económicas y ambientales, no se encuentran antecedentes de su aplicación en Colombia; también se necesitaría una unidad de trituración especial y otra unidad para realizar la separación para recuperar el acero de los residuos cortopunzantes. Adicionalmente, esta tecnología requiere

11. Environmental-Expert. AMB Ecosteryl Equipment in Colombia. Recuperado el 02-04-2016, del sitio web de Environmental-Expert: <http://www.environmental-expert.com>.

de la aplicación de hidróxido de potasio (KOH), lo que podría generar un costo adicional y posiblemente una unidad de tratamiento para los remanentes de este reactivo.

De acuerdo con lo anterior, se seleccionó como alternativa para la recuperación del acero contenido en los RHS-C un equipo Ecosteryl con desactivación por microondas, que permite que la desactivación y trituración se desarrollen en la misma unidad, lo que garantiza el cumplimiento de los lineamientos establecidos en la Resolución 1164 de 2002 respecto al reciclaje de residuos cortopunzantes. Se requeriría adicionar una unidad de separación electromagnética, la cual se encuentra disponible en la planta de Sidenal S.A. (Boyacá).

Estimación y comparación de costos

Una vez seleccionada la alternativa propuesta (que permitiría recuperar el acero contenido en los RHS-C de Bogotá) se realizó una estimación de los costos de operación de este escenario, así como una estimación de los costos asociados a la operación del escenario de gestión actual de RHS, donde éstos son procesados para ser llevados a sitios de disposición final en su totalidad.

- **Recolección o transporte.** Se partió del supuesto de que las rutas para la recolección y disposición de RHS son las mismas en ambos casos. La estimación de la distancia recorrida, consumo de combustible y costos asociados al transporte de los dos escenarios se realizó utilizando las ecuaciones 4 a 6.

Ecuación 4. Distancia recorrida para transportar RHS al lugar de tratamiento y disposición final

$$\left. \begin{array}{l} D = R \times V \\ V = \frac{RHS}{C} \end{array} \right\} \rightarrow D = R \times \frac{RHS}{C}$$

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Donde:

- D*: distancia recorrida/vehículo (km/año).
R: distancia recorrida/veh. por viaje (km/viaje).
V: número total de viajes realizados/veh. (viajes/año).
RHS: cantidad de RHS transportados (t/año).
C: cantidad de RHS que puede transportar el vehículo (t/viaje).

Ecuación 5. Consumo de combustible para transportar los RHS al lugar de tratamiento y disposición final

$$C_c = D \times C_D$$

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Donde:

- C_c*: cantidad total de combustible consumido (diésel o ACPM) para transportar los RHS (gal/año).
C_D: consumo de diésel o ACPM requerido por el vehículo (gal/km).

Ecuación 6. Costo de combustible para transportar los RHS al lugar de tratamiento y disposición final

$$C_{TC} = C_c \times P_C$$

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Donde:

- C_{TC}*: costo por consumo de diésel o ACPM (\$/año).
P_C: precio unitario del combustible (\$/gal o \$/m³).

- **Consumo de energía eléctrica.** Sus costos asociados se estimaron con base en la información técnica de las especificaciones de los equipos de cada alternativa y tomando como referencia el valor unitario actual de energía eléctrica en Colombia (\$495,5/kWh¹²). Para esto, se utilizaron las ecuaciones 7 y 8.

Ecuación 7. Estimación del consumo total de energía eléctrica en el tratamiento y separación de RHS

$$E = \frac{E_E}{C_E} \times RHS$$

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Donde:

- E*: energía total consumida por cada equipo de tratamiento (kWh/año).

12. Codensa S.A. Tarifas de energía Codensa. Recuperado el 8 de mayo de 2016 del sitio web de Codensa (<https://www.codensa.com.co>).

- E_E : energía requerida por cada equipo para su operación durante un tiempo determinado (kWh/h).
 C_E : capacidad del equipo (t/h).

Ecuación 8. Costo de energía eléctrica consumida para el tratamiento y separación de los RHS

$$C_{TE} = E \times P_E$$

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Donde:

- C_{TE} : costo total por consumo de energía eléctrica (\$/año).
 P_E : precio unitario de energía eléctrica (\$/kWh).

- **Personal.** Se realizó una estimación del número de operarios que se requieren para la operación de cada alternativa y sus costos asociados, considerando el SMMLV en el año 2016. Para esto, se utilizaron las ecuaciones 9 y 10.

Ecuación 9. Estimación del personal requerido para el tratamiento y transporte de RHS

$$P = P_E + P_T$$

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Donde:

- P : personal requerido para el funcionamiento de los equipos de cada alternativa (operarios/año).
 P_E : personal requerido para el funcionamiento del equipo durante 24 h/día 30 días/mes, con turnos de 8 h (operarios/año).
 P_T : personal requerido para el transporte de RHS 24 h/día 30 días/mes, con turnos de 8 h (operarios/año).

Ecuación 7. Costo de personal para el tratamiento y separación de los RHS

$$C_{TP} = P \times S$$

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Donde:

- C_{TP} : costo total por pago de servicios del personal (\$/año).
 P : personal requerido.
 S : salario mensual, incluyendo prestaciones, por operario (\$/año).

- **Consumo de agua.** Los procesos de termodestrucción y desactivación utilizan agua tratada después de ser usada en los equipos de lavado de gases y calefacción y luego se recircula al proceso, por lo cual no se hicieron estimaciones de consumo y costos de operación asociados a este recurso.
- **Costos de disposición final de RHS.** Actualmente el valor unitario final es de \$16,5/kg¹³, por lo que el costo anual de disposición final C_{DF} se estimó utilizando la ecuación 7.

Ecuación 8. Estimación de costos de disposición final de RHS

$$C_{DF} = RHS \times C_D$$

Fuente: Elaboración propia, 2016.

Donde:

- C_D : valor unitario de disposición de residuos en relleno o celda de seguridad.

- **Beneficio por aprovechamiento.** Para la alternativa de recuperación del acero contenido en los RHS-C se calculó un beneficio por aprovechamiento de este material, para lo cual se supone un valor comercial de \$550/kg para el total de acero contenido en los RHS cortopunzantes.

Como resultado, se obtuvieron los costos de operación presentados a continuación (tabla 5).

13. G.I. Rodríguez & D.L. Carreño (2014). Evaluación técnica, ambiental y financiera de la alternativa seleccionada para el tratamiento de residuos infecciosos con énfasis en residuos anatomopatológicos. Proyecto de grado. Bogotá, D.C.: Universidad de La Salle. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, p. 74.

Tabla 5
Análisis comparativo entre el escenario actual y la alternativa propuesta

Criterio comparativo		Gestión actual de RHS Por tipo de tratamiento			Gestión actual de RHS-C Por tipo de tratamiento			Alternativa Gestión de RHS-C 1.028,1 ton/año	
		1.640 ton/año	8.606 ton/año	Total	106,7 ton/año	921,4 ton/año	Total		
Tratamiento	Tipo	Termodestrucción	Esterilización		Termodestrucción	Esterilización		Microondas	
	Lugar	PTALS	ECOCAPITAL		PTALS	ECOCAPITAL		ECOCAPITAL	
Aprovechamiento	Tipo	No aplica	No aplica		No aplica	No aplica		Fundición	
	Lugar	No aplica	No aplica		No aplica	No aplica		SIDENAL	
Disposición final	Tipo	Celda de seguridad	Relleno sanitario		Celda de seguridad	Relleno sanitario		No aplica	
	Lugar	PTALS	RSDJ		PTALS	RSDJ		No aplica	
C _c	Tratamiento	GLP (gal/año)	10.311,0	10.311	677,9	677,9	0		
		GN (m ³ /año)	29.231,7	1.074,1	30.305,8	1.870,2	115	1.985,2	0
	Transporte	V (viajes/año)	468,6	478,1	946,7	30,5	51,2	81,7	57,1
		R (km/viaje)	34,3	57,3	91,6	34,3	57,3	91,6	457
		D (km/año)	16.072,4	27.395,8	43.468,2	1.045,2	2.933,1	3.978,3	26.101,2
		C _c (gal/año)	592,1	1.658,2	2.250,3	38,5	177,5	216	961,6
C _{DF}		\$26.319.830	\$139.111	\$26.458.941	\$2.712	\$14.786.996	\$14.789.708	\$0	
C _{CC}		\$62.061.650	\$13.602.226	\$75.663.876	\$4.000.145	\$1.456.331	\$5.456.476	\$6.959.874	
E (kWh/año)		550.588,2		550.588,2	39.147		39.147	493.467,7	
C _{TE}		\$230.310.398	\$0	\$230.310.398	\$16.375.161	\$0	\$16.375.161	\$206.416.927	
P	P _E	Operario	3	6	9	3	6	9	12
		Auxiliar	3	0	3	3	0	3	0
	P _T	Operario	6	6	12	6	6	12	12
		Auxiliar	0	0	0	0	0	0	0
C _{TP}		\$273.024.180	\$297.844.560	\$570.868.740	\$17.754.555	\$31.888.922	\$49.643.477	\$59.769.696	
Costo total anual		\$591.716.058	\$311.585.897	\$903.301.955	\$38.132.573	\$48.132.250	\$86.264.823	\$273.146.496	
Beneficio por aprovechamiento		\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0	\$141.865.434	

* Pesos COP constantes 2016.

Fuente: Elaboración propia, 2016.

De acuerdo con esto, la alternativa de aprovechamiento podría representar una recuperación de costos anual del orden de \$142 millones, con lo que el costo anual de operación de la gestión de RHS con aprovechamiento del acero asciende un 5 % con respecto a los costos de la operación actual:

- Costo alternativa de aprovechamiento RHS-C, menos retorno por aprovechamiento: \$131.281.062.
- Costo adicional con respecto a la gestión de RHS-C actual: \$45.016.239.
- Costo adicional con respecto a la gestión de RHS total actual: $\$45.016.239 / \$903.301.955 = 5 \%$.

Finalmente, se estima que la cantidad de cenizas dispuestas en el relleno de seguridad del PTALS oscila entre 82 y 98,4 t, las cuales podrían reducirse a valores entre 40,2 y 47,5 t:

$$(1640 t) \times \left\{ \begin{array}{l} (0,05) = 82 t \\ \rightarrow (82 t) \times (0,51) = 41,8 t \\ \rightarrow (82 t) - (41,8 t) = 40,2 t \\ (0,059) = 96,8 t \\ \rightarrow (96,8 t) \times (0,51) = 49,3 t \\ \rightarrow (96,8 t) - (49,3 t) = 47,5 t \end{array} \right.$$

Tomando como referencia los datos del 2013, la cantidad total de residuos biosanitarios y cortopunzantes esterilizados que son dispuestos en el RSDJ podría llegar a ser 8606 t, lo cual se podría reducir en un 10,7 %:

$$\frac{(921,4 t)}{(8606 t)} \times 100 = 10,7 \%$$

CONCLUSIONES

- Actualmente, los RHS-C generados por los ESS en Bogotá son tratados por termodestrucción y sus cenizas son dispuestas en el relleno de seguridad PTALS, o sometidos a desactivación de alta eficiencia y llevados a una celda de seguridad del RSDJ.

- En Bogotá, los ESS pueden llegar a generar más de 1000 t de RHS-C al año, de los cuales unas 258 t son de acero.
- La normativa vigente en Colombia exige procesos para la eliminación de las características de peligrosidad de los RHS, implicando costos de procesamiento y disposición del orden de \$86 millones anuales.
- De acuerdo con la Resolución 1164 de 2002, los residuos cortopunzantes se podrán reciclar en plantas de fundición de metales, previa desactivación patógena de éstos, viabilizando jurídicamente el aprovechamiento del acero contenido en los RHS.
- Se encontraron diferentes tecnologías disponibles para recuperar el acero que contienen los RHS-C, incluyendo tecnologías actualmente utilizadas para otros fines que se podrían adecuar para aplicarlas al procesamiento de estos residuos.
- El aprovechamiento del acero contenido en los RHS-C generados en Bogotá podría implicar un costo adicional de tan solo un 5 % del costo anual de la gestión de RHS actual.
- El escenario de aprovechamiento del acero contenido en los RHS podría mejorar el esquema actual de GIRHS, donde se prefiere la alternativa de reciclar antes de llevar a sitios de disposición final.
- Desde los puntos de vista económico, legal, técnico y ambiental, resulta viable hacer un cambio en la GIRHS generados en Bogotá, con el fin de aprovechar el acero contenido en los RHS-C.

REFERENCIAS

- [1] Ecocapital S.A. ESP. Ambiental. Recuperado el 19-01-2016, del sitio web de Ecocapital (www.ecocapital-int.com/index.php?option=com_content&view=article&id=19&Itemid=119). DS).
- [2] Ecocapital S.A. ESP. Ambiental. Recuperado el 19-01-2016, del sitio web de Ecocapital (www.ecocapital-int.com/index.php?option=com_content&view=article&id=19&Itemid=119). DS).
- [3] Ecocapital S.A. ESP. Ecocapital [diapositivas]. Bogotá: Ecocapital S.A. ESP. 51 diapositivas en color.
- [4] Proarc S.A. ESP (2015). *Estudio de impacto ambiental para la operación de transporte, recolección, tratamiento y disposición de residuos peligrosos y no peligrosos*. Mosquera, Colombia: Proarc S.A. ESP.
- [5] Moreno, D. (2014). Área de tratamiento de Ecocapital S.A. ESP. Bogotá, Colombia. Observación inédita.
- [6] Proarc S.A. ESP (2015). *Estudio de impacto ambiental para la operación de transporte, recolección, tratamiento y disposición de residuos peligrosos y no peligrosos*. Mosquera, Colombia: Proarc S.A. ESP.

[7] Maxisalud. Recolectores de cortopunzantes. Recuperado el 4 de enero de 2016, del sitio web de Maxisalud (www.maxisalud.co/nuestros-productos.html).

[8] Tchobanoglous, G., Theisen, H. & Vigil, S. (1994). *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. Nueva York: McGraw Hill, p. 82.

[9] Instituto de Higiene Ambiental Ltda. (Ihaltda) (2010). Informe de caracterización de residuos: ceniza. Prueba Cretip/TCLP Ecocapital. Bogotá: Ihaltda.

[10] Bonilla, J. Tecniamsa S.A. ESP (2016). Mosquera, Colombia: Observación inédita.

[11] Environmental-Expert. AMB Ecosteryl Equipment in Colombia. Recuperado el 02-04-2016 del sitio web de Environmental-

Expert (<http://www.environmental-expert.com/products/location-colombia/brand-amb-ecosteryl>).

[12] Codensa S.A. Tarifas de energía Codensa. Recuperado el 8 de mayo de 2016 del sitio web de Codensa (<https://www.codensa.com.co/hogar/tarifas>).

[13] Rodríguez, G.L. & Carreño, D.L. (2014). Evaluación técnica, ambiental y financiera de la alternativa seleccionada para el tratamiento de residuos infecciosos con énfasis en residuos anatomopatológicos. Proyecto de grado para optar al título de ingeniero ambiental y sanitario. Bogotá, D.C.: Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, p. 74.

Estudio del fenómeno de la sequía en el comportamiento de los suelos arcillosos, utilizando una cámara de simulación climática

Study of the effects of drought on the behavior of clay soils using a climatic chamber

CATALINA LOZADA

Profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

catalina.lozada@escuelaing.edu.co

Recibido: 25/11/2016 Aceptado: 23/03/2017

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

Resumen

Para modelar el proceso de desecación en capas de suelo arcilloso se construyó una cámara de simulación climática, la cual permite hacer la medición de las variables climáticas. En este artículo se presentan ensayos de evaporación realizados en agua y en suelo para diferentes condiciones climáticas, similares a las encontradas en la sabana de Bogotá. El suelo se preparó a partir de un estado líquido y posteriormente se secó, controlando la temperatura, la radiación infrarroja, la velocidad del viento y la humedad relativa. En la primera parte de este artículo se muestra el impacto del cambio climático en la sequía y se describe el proceso de evaporación potencial y real. Adicionalmente, se describen el proceso de formación de fisuras y la revisión de los equipos existentes que simulan el proceso de evaporación en el laboratorio. En la segunda parte se detallan la cámara de simulación climática, los rangos de operación y los principios de operación teóricos. Finalmente, se presentan los resultados experimentales para el proceso de desecación en agua y en suelo. Como resultado, se evidencia que los ensayos de desecación realizados en la cámara climática permiten simular todas las variables climáticas de una manera muy precisa y acoplada. Los resultados experimentales indican que la tasa de evaporación aumenta con la radiación infrarroja en el suelo y en el agua. La tasa de evaporación al principio de los ensayos de desecación es la misma que en los ensayos en agua. Sin embargo, esta tasa disminuye a medida que el agua se evapora.

Palabras claves: evaporación, clima, arcilla, fisuras, sabana de Bogotá.

Abstract

A climatic chamber was designed for modeling desiccation in soil layers. This chamber allows the measurement of different environmental variables. In this paper, evaporation tests were conducted in water imposing boundary conditions like the ones on the Savannah of Bogota, and then these tests were performed in a soil layer. The soil was prepared from a slurry state and was dried controlling temperature, infrared radiation, wind velocity, and relative humidity. In the first part of this paper, the impact of climate change and the process of potential and actual evaporation is described, then the process of formation of desiccation cracks and different devices for desiccation simulation are presented. The second part of this paper describes the climatic chamber, the operation ranges and theoretical work principles. Finally, the experimental results for desiccation in water and soil are presented. The desiccation tests performed with the climatic chamber allow simulating all environmental conditions accurately during drying coupling the effect of all variables. As a result, the evaporation rate increases with infrared radiation in soil and water. The evaporation rate at the beginning of the desiccation tests in clays is the same as in water. However, this evaporation rate decreases as the soil becomes desiccated.

Keywords: evaporation, climate, clay, cracks, Savannah of Bogotá.

INTRODUCCIÓN

La sequía es uno de los eventos naturales extremos que, según se pronostica, se incrementarán en diferentes lugares del mundo como resultado del calentamiento global. Durante el fenómeno de la sequía, el agua se evapora de los poros del suelo y el suelo se contrae. El proceso contrario ocurre durante los periodos de lluvia, el contenido de humedad aumenta y el suelo se expande. Estos cambios de volumen generan gran afectación en las estructuras geotécnicas y en las vías. Por lo tanto, el estudio de la interacción entre las variables climáticas y el suelo durante los procesos de evaporación potencial (EP) y de evaporación real (ER) es crítico para entender el comportamiento de las estructuras geotécnicas sometidas a estos fenómenos climáticos.

La evaporación potencial está definida como la evaporación que ocurre cuando la fuente de agua está disponible en la superficie. La EP depende de las variables ambientales, como la velocidad del viento, la humedad relativa, la temperatura y la radiación solar. La evaporación real se define como la evaporación que ocurre cuando la fuente de agua no es ilimitada en la superficie del suelo. Los mecanismos que afectan la ER incluyen las mismas variables que la evaporación potencial y, adicionalmente, las restricciones mecánicas asociadas con la succión del suelo.

La evaporación del agua desde la superficie del suelo puede generar fisuras. Estas fisuras pueden variar de tamaño y de características geométricas, dependiendo de las propiedades intrínsecas y de las condiciones de frontera. Se han encontrado fisuras de desecación muy grandes en diversas partes del mundo (Arizona, Estados Unidos; Nextipac, México, y la sabana de Bogotá, Colombia). Estas fisuras producen daños en las vías y en estructuras de cimentación. Debido a lo anterior, el estudio de la interacción suelo-atmósfera y el comportamiento mecánico del suelo con fisuras generadas por la sequía son fundamentales para entender el comportamiento del suelo y para mejorar el diseño de cimentaciones en estos suelos.

El presente artículo está dividido en dos partes principales:

- Primero se hace una revisión bibliográfica sobre el efecto del cambio climático y los factores ambientales que afectan la sequía, se describe el proceso de evaporación potencial y real, y se presentan casos

reales de suelos con formación de fisuras de desecación muy grandes (especialmente, se describen las fisuras encontradas en la sabana de Bogotá).

- En la segunda parte del artículo se describen los equipos de laboratorio existentes que permiten simular la interacción suelo-clima, y se detalla una cámara de simulación climática construida para acoplar todas las variables climáticas y estudiar el proceso de evaporación. Finalmente, se presentan los resultados experimentales de evaporación potencial y real, las conclusiones generales y el trabajo futuro.

CAMBIO CLIMÁTICO Y SEQUÍA

La superficie de la Tierra y la atmósfera han aumentado su temperatura durante las últimas décadas, los niveles del mar se han incrementado, y el total de nieve y hielo ha disminuido (IPCC, 2014). Las tres últimas décadas en el periodo de 1983 a 2012 han sido las más calientes desde 1850 y el aumento de la temperatura global, incluyendo la Tierra y el océano, muestra una tendencia lineal de 0,85 °C desde 1880 hasta el 2012. Los cambios observados en el clima global son una consecuencia directa de las actividades humanas que involucran la emisión de gases de efecto invernadero.

La Revolución Industrial permitió el crecimiento económico y de población, haciendo las sociedades industrializadas y urbanas. Después de la era industrial, la concentración histórica de los gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (NH₄) y el óxido nitroso (NO₂), han alcanzado niveles máximos con respecto a los últimos 800.000 años. Varios estudios revelan que el dióxido de carbono fue el mayor único contribuyente al cambio climático entre 1750 y 2011 (IPCC, 2014).

Las emisiones globales de CO₂ provienen de los combustibles fósiles, la producción de cemento, la quema de gases, la deforestación y el cambio en el uso de la Tierra. Cerca de la mitad de las emisiones antropogénicas de CO₂ entre 1750 y 2011 ocurrieron en los últimos 40 años. Cerca del 40 % de estas emisiones permanecen en la atmósfera, 30 % fueron removidas de la atmósfera y se sumieron en el océano, y el resto de emisiones están almacenadas en reservorios naturales del ciclo del carbono. A pesar de las políticas para reducir el calentamiento global, las emisiones totales anuales de dióxido de carbono continúan en aumento

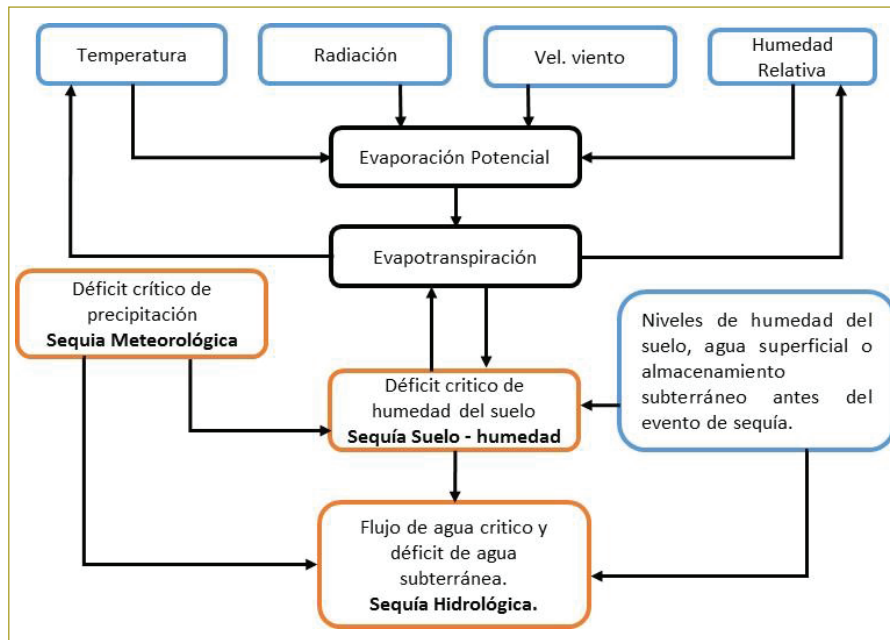


Figura 1. Factores que influyen en la desecación. Adaptada de Seneviratne et al. (2012).

(Cook et al., 2013; Doran & Zimmerman, 2009; IPCC, 2014; Oreskes, 2004).

Diferentes impactos se han atribuido al cambio climático y pueden evidenciarse en eventos climáticos y meteorológicos extremos. Estos eventos son olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios forestales. Los principales impactos incluyen la alteración de los ecosistemas, la interrupción de la producción de alimentos, el almacenamiento de agua, los daños en la infraestructura, los asentamientos diferenciales, la morbilidad, la mortalidad y las consecuencias en la salud humana (Gill et al., 2007).

Específicamente, la sequía es uno de los eventos extremos que al parecer aumentarán en los próximos años en diferentes partes del mundo. Como se muestra en la figura anterior (figura 1), la sequía es un fenómeno complejo, el cual depende principalmente de la precipitación y de otras variables, como la temperatura, la velocidad del viento y la radiación solar (Seneviratne et al., 2012; Sheffield et al., 2012). La sequía es afectada también por el contenido de humedad del suelo y las condiciones de la superficie, como la presencia de vegetación.

Dependiendo de las condiciones ambientales y de frontera, la sequía se puede clasificar en tres clases: meteorológica, agrícola e hidrológica. La sequía meteorológica es producida por un déficit crítico de precipitación,

la sequía agrícola es causada por un déficit de humedad del suelo y la sequía hidrológica es ocasionada por un déficit de agua subterránea y de escorrentía superficial (IPCC, 2014).

Al finalizar el siglo XXI, se espera que como consecuencia de la disminución de la precipitación y el aumento de la evaporación, las sequías meteorológicas y agrícolas tengan periodos más largos y frecuentes en algunas regiones y estaciones. Sin embargo, en la modelación del cambio climático hay mucha incertidumbre en la afirmación de reducciones sustanciales en el flujo de ríos, lagos y niveles de agua subterránea debidos al déficit de lluvia y al contenido de humedad del suelo.

EVAPORACIÓN POTENCIAL Y EVAPORACIÓN REAL

El estudio de la sequía requiere el entendimiento de los mecanismos que afectan la evaporación real en el suelo. Estos mecanismos son complejos e involucran procesos de transferencia de calor y de masa, fuera de las restricciones mecánicas asociadas con la succión del suelo. Por lo tanto, para entender estos mecanismos que afectan la evaporación real en el suelo, primero es necesario estudiar el proceso de evaporación del agua o la evaporación potencial.

La transferencia de calor a través de la interfase aire-agua está dada por diferentes procesos de transferencia de calor: radiación (q_{rad}), emisión térmica (q_{th}), convección (q_{conv}) y evaporación (q_{evap}) (figura 2).

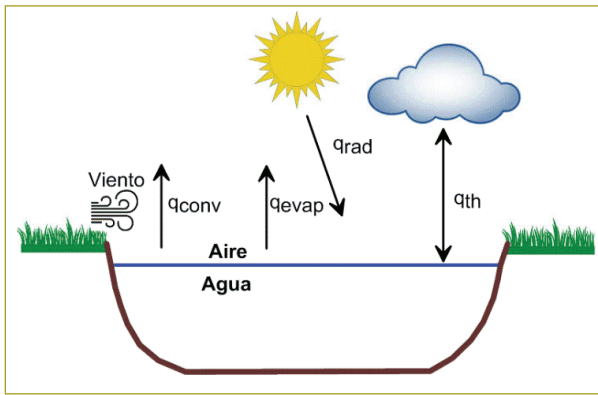


Figura 2. Intercambio de calor a través de la interfase aire-agua.

El flujo de calor sensible (q_{sens}) se define en la ecuación 1 e involucra todos los mecanismos de transferencia de calor. El flujo de calor sensible se obtiene cuando el agua está en equilibrio con las variables ambientales en estado estable.

$$q_{sens} = q_{rad} + q_{th} + q_{conv} + q_{evap} \quad (1)$$

Entre los mecanismos de transferencia de calor, es de especial interés el estudio de la transferencia de calor por evaporación (q_{evap}). La evaporación se define como el cambio de fase de un líquido saturado a vapor saturado.

Dalton (1802) estableció la ecuación 2 para calcular la evaporación potencial. Esta ecuación indica que la tasa de evaporación depende de la diferencia entre la presión de saturación de vapor de la superficie evaporante y la presión de vapor del aire sobre la superficie, diferencia conocida como el déficit de presión de vapor (DPV). Esta relación es afectada por una función que indica la tasa a la cual el viento se lleva las moléculas de agua evaporada.

$$\frac{dm}{dt} = f(V_w)(\bar{u}_v - \bar{u}_{vo}) \quad (2)$$

Donde: \bar{u}_{vo} es la presión de saturación a la temperatura de la superficie del agua, \bar{u}_v es la presión de vapor del aire, y $f(V_w)$ es una función de la velocidad del viento, V_w .

Una de las principales limitaciones de la ecuación de Dalton es que se requiere el conocimiento de la temperatura de la superficie del agua para determinar \bar{u}_{vo} . Para solucionar esta limitación, aproximaciones como la de Penman (1948) y la relación de Bowen combinan diferentes ecuaciones físicas y empíricas para obtener la evaporación potencial. Actualmente, la ecuación de Penman se emplea ampliamente para calcular la evaporación de superficies de agua. Sin embargo, debido a que la ecuación es empírica, se requieren muchas constantes. Además, el efecto de la velocidad del viento no está validado experimentalmente (Blight, 2002).

Debido a lo anterior, es necesario estudiar la evaporación potencial antes de estudiar el proceso de evaporación real. Para lograr este objetivo se construyó una cámara climática, en la que se simulaban las variables climáticas: la velocidad del viento, la temperatura, la radiación y la humedad relativa. Los detalles de la construcción y de la operación de la cámara se presentan en los siguientes apartes de este artículo.

Por otra parte, el proceso de evaporación real en estratos de suelo es un proceso físico muy complejo, en el cual ecuaciones diferenciales parciales de flujo de calor y de humedad se deben resolver en forma simultánea. La evaporación real es la misma que la evaporación potencial si el suelo está completamente saturado en la superficie. A medida que la evaporación continúa, la disminución del contenido de humedad produce un aumento en la succión del suelo. La succión ocurre cuando hay un equilibrio de la presión de vapor en el suelo y es controlada principalmente por su estructura. Por lo tanto, la variable mecánica que limita el proceso de evaporación real es la succión (Gitirana et al., 2006; Wilson et al., 1994).

FISURAS DE DESECACIÓN

La desecación en el suelo genera un menisco de agua en la superficie y, como consecuencia, fuerzas capilares. La teoría más común de formación de fisuras indica que a medida que el agua se evapora, las fuerzas capilares permiten el aumento de los esfuerzos de tensión en el suelo. Una vez que estos esfuerzos sobrepasan la resistencia a la tensión en el suelo, se inician las fisuras (Kodikara et al., 2004). Estas fisuras usualmente se crean en las zonas más débiles del suelo, donde la resistencia es menor.



Figura 3. Diferentes geometrías de fisuras de desecación encontradas en Colombia: a) Lago Calima, 19 de abril de 2013. Tomado de elpais.com. b) Parque Salamanca, 2014. Tomado de eltiempo.com. c) Puerto menor de Barrancabermeja, 20 de junio de 2012. Tomado de vanguardia.com. d) Casanare, 2 de abril de 2014. Tomado de Colprensa.

Las fotos en las que se muestran diferentes geometrías de fisuras se tomaron en Colombia entre el 2012 y el 2015, cuando varias sequías extremas ocurrieron durante el fenómeno del Niño (figura 3). La formación de fisuras y su estructura geométrica dependen de las características intrínsecas del suelo y de las condiciones de frontera (Corte & Higashi, 1964).

Las condiciones intrínsecas incluyen el contenido de finos, el índice de plasticidad, la mineralogía, el contenido de humedad inicial, la resistencia a la tracción y la densidad seca. Entre las condiciones de frontera relevantes se incluyen: la rugosidad del material de base del suelo, el gradiente de temperatura, la humedad, el espesor de la capa de suelo, la velocidad del viento, el tamaño de la muestra, la radiación y los ciclos hidráulicos de humedecimiento y de secado.

En varias partes del mundo se han identificado fisuras de desecación muy grandes (varios metros de profundidad y de longitud). Entre estos lugares se encuentran Arizona, Estados Unidos (Harris, 2004; Shin & Santamarina, 2011); Nextipac, México (Suárez-Plascencia et al., 2005), y la sabana de Bogotá, Colombia (Vesga et al., 2003). El mecanismo de formación de estas fisuras es muy complejo y depende de las condiciones geológicas, de las condiciones del agua subterránea y del proceso de desecación en la superficie. Debido a sus dimensiones, estas fisuras afectan la estabilidad de cimentaciones superficiales y de vías.

Igualmente, se pueden observar imágenes satelitales tomadas de Google Earth, en las que se evidencian fisuras de desecación muy grandes en el municipio de Tenjo, situado en la sabana de Bogotá (figura 4). Estas imágenes permiten diferenciar dos tipos de fisuras:

Fisuras aisladas, que tienen longitudes mayores de 145 m en algunos lugares. Estas fisuras pueden encontrarse también cerca de árboles en los que las raíces absorben el agua durante los periodos de sequía, produciendo una contracción del suelo. Estas fisuras se encuentran alineadas en una dirección pero no interconectadas (figura 4a).

En otros lugares, las fisuras se interconectan, creando arreglos de fisuras. Las celdas creadas por la interconexión varían de tamaño (figura 4b).

Una consecuencia de las fisuras de la sabana de Bogotá es la inestabilidad de muchas construcciones. En el tanque que aparece en la página siguiente es posible ver un ejemplo de asentamiento diferencial (figura 5). Adicionalmente, vías principales resultan bastante dañadas debido a la contracción severa del suelo durante la desecación (figura 6).



Figura 4. Fisuras de desecación de la sabana de Bogotá. a) Vista satelital de fisuras aisladas. b) Vista satelital de fisuras interconectadas. Tomado de Google Earth, 2016.



Figura 5. Asentamientos diferenciales producidos en el municipio de Tenjo (Cundinamarca).

EQUIPOS DE SIMULACIÓN DEL CLIMA

Muchos autores han investigado el proceso de evaporación en los suelos, utilizando modelos físicos y numéricos. La validación de los modelos numéricos y el estudio del proceso de evaporación pueden lograrse a través de la modelación física a escala reducida o una a tamaño real (Randolph & House, 2001). La modelación física a tamaño real genera grandes costos en la construcción y dificultades en el control de las variables ambientales. Por lo tanto, la modelación a escala reducida ofrece una alternativa razonable. Estos modelos reducidos pueden realizarse utilizando una centrífuga geotécnica, aumentando la aceleración de la gravedad N veces (Garnier et al., 2007; Taylor, 2003), o sin el uso de una centrífuga a una aceleración de la gravedad, $1 \times G$.

Las cámaras climáticas construidas a una escala reducida pueden simular variables climáticas individuales o múltiples, como la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento, la presión atmosférica y la lluvia. A pesar de la necesidad de introducir este equipo de laboratorio, la implementación es muy limitada debido principalmente a dos factores: las restricciones físicas en la simulación de todas las variables y la correcta simulación de los esfuerzos en el suelo. Sin embargo, hacer cámaras climáticas adaptadas a la centrífuga geotécnica implica un gran desafío debido a la alta demanda de potencia, las limitaciones de espacio y la complejidad en la instrumentación.

SIMULACIÓN DEL CLIMA UTILIZANDO UNA CÁMARA CLIMÁTICA

Como parte de mi tesis doctoral en la Universidad de los Andes (Bogotá) y en la École Centrale de Nantes (Francia), se diseñó y construyó una nueva cámara de simulación climática para realizar ensayos de desecación en suelos arcillosos (Lozada et al., 2016). Esta cámara climática tiene diferentes subsistemas que permiten simular las variables climáticas que afectan el proceso de evaporación. En el trabajo experimental presentado a continuación se simulan variables ambientales similares a las encontradas en la sabana de Bogotá.

En la cámara climática el aire fluye, siguiendo un camino termodinámico particular a través de un circuito cerrado (figura 7). Los subsistemas incluidos en la cámara climática se describen a continuación (figura 8).

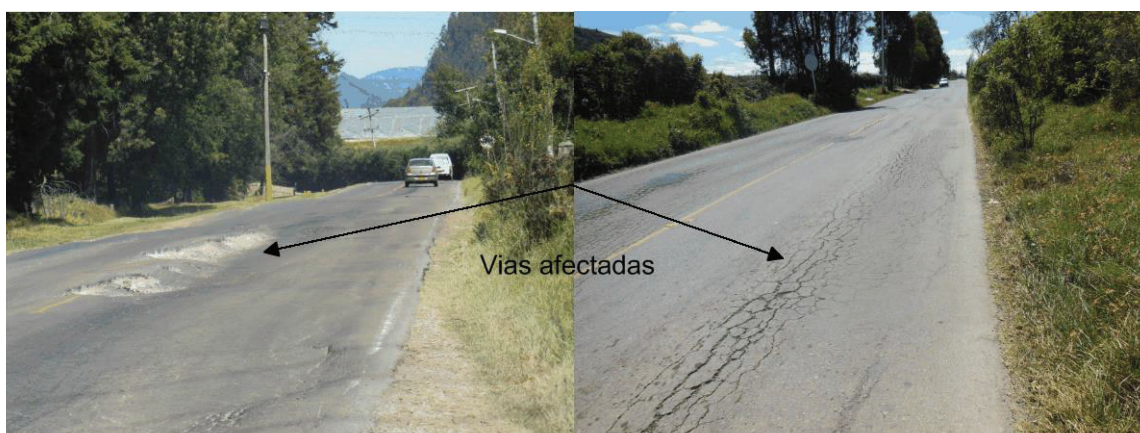


Figura 6. Vías afectadas en el municipio de Tenjo (Cundinamarca).

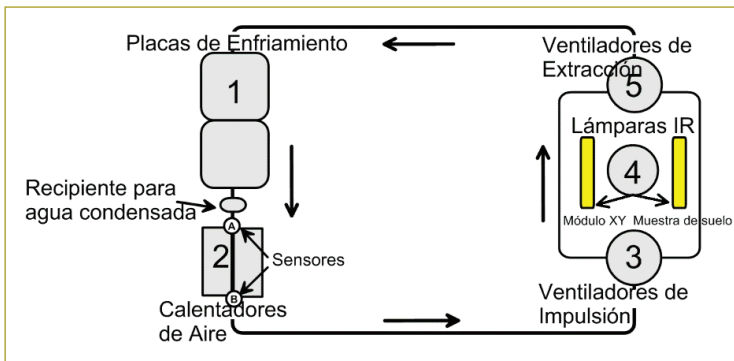


Figura 7. Circuito del aire en la cámara climática.

El camino termodinámico que sigue el aire en la cámara es el siguiente:

- [1] Dos placas de enfriamiento (PE) condensan el agua para obtener una humedad relativa específica en la cámara (figura 8a).
- [2] Una vez que el aire es enfriado, éste pasa a través de dos calentadores de aire para imponer una temperatura en la cámara (figura 8a). Adicionalmente, el aire se calienta con dos lámparas infrarrojas que simulan la radiación solar.
- [3] Para impulsar el aire desde los calentadores y para simular la velocidad del viento sobre la muestra de suelo se instalaron seis ventiladores (figura 8b).
- [4] Después que el aire pasa sobre la muestra de suelo, es impulsado hacia las placas de enfriamiento por medio de cuatro ventiladores de extracción (figura 8b).
- [5] Finalmente, el circuito comienza de nuevo.

Instrumentos de medición

Como se puede apreciar (figura 8b), dentro de la caja adiabática donde se ubica la muestra se incluye un robot XY. Este robot contiene un módulo XY en el que se instalaron varios sensores: radiación infrarroja, presión atmosférica, velocidad del viento, humedad relativa y desplazamiento láser.

Para simular las variables climáticas, la cámara de simulación climática contiene los siguientes subsistemas:

Radiación solar

El suelo y el aire se calientan con dos lámparas infrarrojas, las cuales simulan la radiación solar. Para calcular la radiación emitida por las lámparas, se comparó el espectro de radiación normalizada para la temperatura del cuerpo negro del Sol y de las lámparas. La radiación infrarroja directa (IR) en la superficie del suelo se calculó con una relación geométrica para el intercambio de calor por radiación.

La radiación infrarroja en la cámara climática se obtuvo con dos lámparas separadas 40 cm entre ellas y con una distancia entre las lámparas y la superficie de 30 cm. La máxima radiación simulada con las lámparas fue de 1040 W/m^2 . La radiación promedio en Bogotá se encuentra entre 210 y 220 W/m^2 .

Velocidad del viento

Se instalaron seis ventiladores en la entrada de la caja adiabática para conducir el aire sobre la muestra de

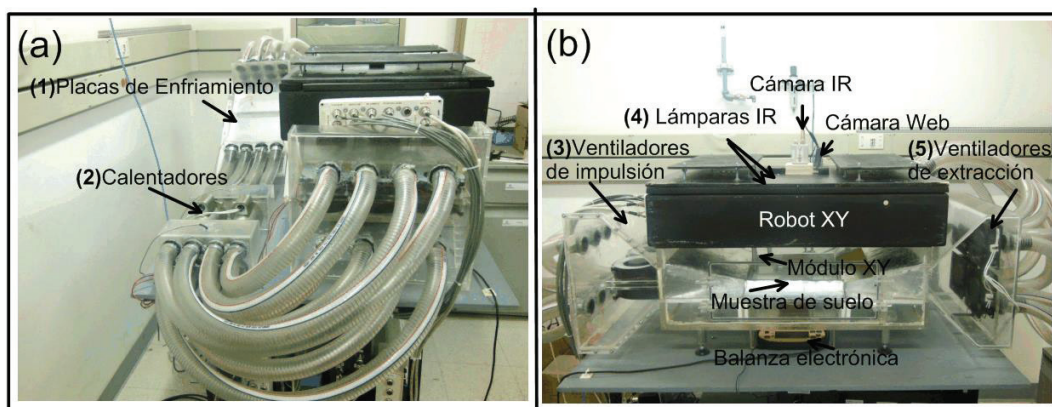


Figura 8. Componentes de conducción de aire en la cámara climática. a) Vista lateral. b) Vista frontal.

suelo y simular la velocidad del viento, velocidad que mide un sensor ubicado en el módulo XY a 1,5 cm de la superficie del suelo. La velocidad del viento se midió en el centro del contenedor de suelo. Las medidas se hicieron variando la potencia de los ventiladores. Durante el ensayo, los ventiladores de extracción se mantuvieron a una potencia eléctrica del 100 %. La máxima velocidad del viento alcanzada fue de 1,76 m/s. La velocidad del viento promedio encontrada en el municipio de Tabío, en la sabana de Bogotá, es de 1,8 m/s. Sin embargo, el valor máximo registrado entre los años 1991 y 2012 fue de 2,8 m/s.

Temperatura y humedad relativa

Para obtener condiciones específicas de humedad relativa y de temperatura en la cámara, se impuso la temperatura de las dos placas de enfriamiento y la temperatura de los dos calentadores. La temperatura de las dos placas de enfriamiento permite la condensación del agua, alcanzando un 100 % de saturación del aire. Por lo tanto, la temperatura aplicada por las dos placas de enfriamiento se compara con la temperatura de punto de rocío teórico.

Para calibrar el rango de condiciones climáticas y de temperatura en la cámara climática se hicieron quince ensayos, variando la temperatura de los calentadores y la temperatura de las placas de enfriamiento. El rango de operación de la cámara se obtuvo para temperaturas de las placas de enfriamiento entre 0 y 12 °C y temperaturas de los calentadores entre 22 y 39 °C. Con estas condiciones se obtuvieron humedades relativas entre 18 - 40 % y temperaturas entre 23 - 38 °C. Sin embargo, para los ensayos de evaporación potencial la humedad relativa dentro de la cámara varía dependiendo de la disponibilidad de agua en el interior de la cámara (Lozada et al., 2016).

Operación de la cámara climática

Principio de operación teórico

Para el diseño de la cámara de simulación climática se consideraron principios fundamentales de física, concernientes a la evaporación y la condensación del agua, el calentamiento por radiación y la transferencia de calor por convección (Lozada et al., 2016).

Adicionalmente, las variables del aire húmedo, como la humedad relativa (RH) la temperatura del aire (T_a) y la relación de mezcla e (relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco) se usaron para describir el estado de vapor en la atmósfera artificial creada en la cámara climática. El diagrama de Mollier resume estas funciones de humedad en un cuadro que indica la relación de mezcla como función de la temperatura. Más adelante se muestra el ciclo termodinámico aplicado por las placas de enfriamiento y los calentadores usados para controlar la humedad relativa y la temperatura utilizando el diagrama de Mollier (figura 9). El ciclo se describe a continuación:

- El punto C representa las propiedades termodinámicas del aire en su estado inicial.
- La temperatura de las placas de enfriamiento se reduce, resultando en una disminución de la temperatura del aire y en un aumento de la humedad relativa. Si el enfriamiento continúa, la relación de mezcla disminuye y el aire alcanzará la curva de saturación. En este punto, el vapor de agua se condensa. El proceso sigue el camino C-D-E.
- El agua condensada es conducida hasta un contenedor que permite calcular el volumen de agua.
- El aire se calienta nuevamente al fluir a través de los calentadores, la temperatura aumenta y la humedad relativa disminuye a lo largo del camino E-A.

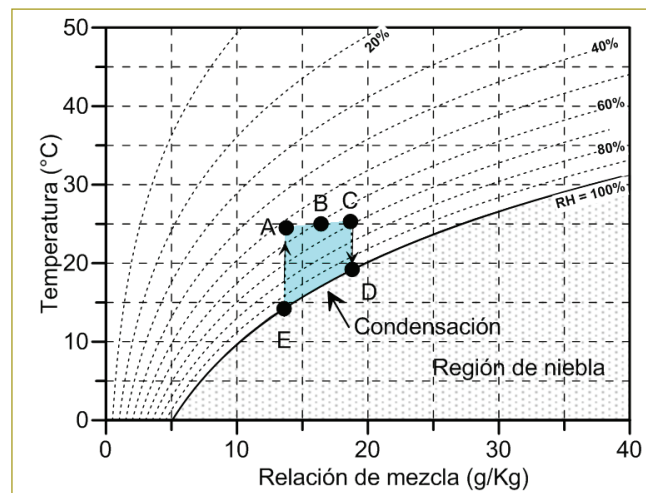


Figura 9. Ciclo termodinámico aplicado por las placas de enfriamiento y los calentadores.

- Finalmente, el camino A-B-C indica que cuando el aire circula sobre el suelo su temperatura y humedad relativa aumenta o disminuye, dependiendo de las propiedades del suelo en la superficie. Posteriormente, el ciclo empieza de nuevo.

EVAPORACIÓN POTENCIAL Y EVAPORACIÓN REAL

Ensayos de evaporación potencial

Para determinar la tasa de evaporación potencial, y posteriormente comparar con la tasa de evaporación real, se realizaron ensayos en agua controlando la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa.

Procedimiento del ensayo

Los ensayos T2 y T3 se hicieron para determinar el efecto de la radiación infrarroja en la tasa de evaporación, con las mismas condiciones iniciales de velocidad del viento y humedad relativa inicial (tabla 1). El procedimiento se dividió en tres partes:

- Se impusieron las condiciones ambientales en la cámara climática sin agua durante 30 minutos, con el fin de acondicionar la cámara.
- Se adicionaron 500 gramos de agua en un contenedor de vidrio cuadrado y posteriormente se introdujo en la cámara climática.
- Se inició el ensayo de evaporación y se registraron los valores de humedad relativa, temperatura, presión atmosférica y velocidad del viento. Adicionalmente, se pesó el agua dentro del contenedor con una balanza electrónica.

Tabla 1

Condiciones ambientales aplicadas para los ensayos de evaporación en agua

Ensayo	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura calentadores (°C)	Radiación infrarroja (W/m ²)	Temperatura placas de enfriamiento (PE) (°C)
T2	1,76	18,5	371,7	0
T3	1,76	18,5	0	0

Resultados experimentales

Es posible ver el ciclo termodinámico para el ensayo T2 (figura 10), así como el ciclo termodinámico para el ensayo T3 (figura 11). Los puntos A, B, C de las figuras están localizados sobre la superficie del agua, y el punto D corresponde a la temperatura de las placas de enfriamiento. Además, el punto D representa un punto medio en el camino del aire cuando pasa sobre las placas de enfriamiento. El aumento de la radiación infrarroja produce un incremento de la temperatura del aire y una disminución de la humedad relativa. Por esta razón, el ciclo termodinámico se expande a medida que la radiación aumenta (figura 11).

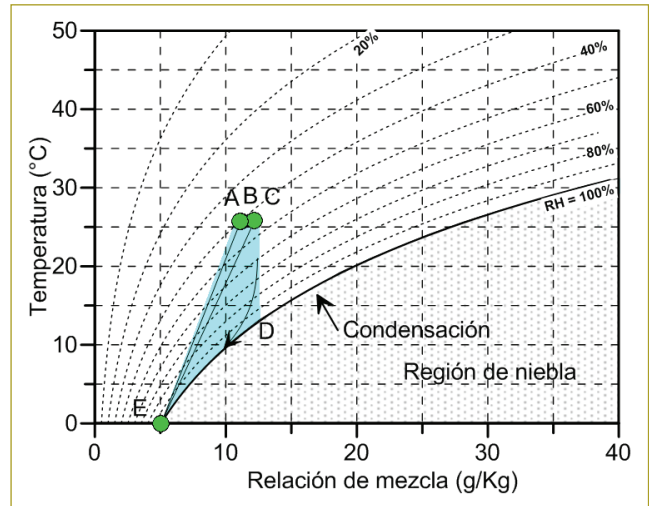


Figura 10. Ciclo termodinámico aplicado por las placas de enfriamiento y los calentadores. Ensayo T3 sin radiación infrarroja.

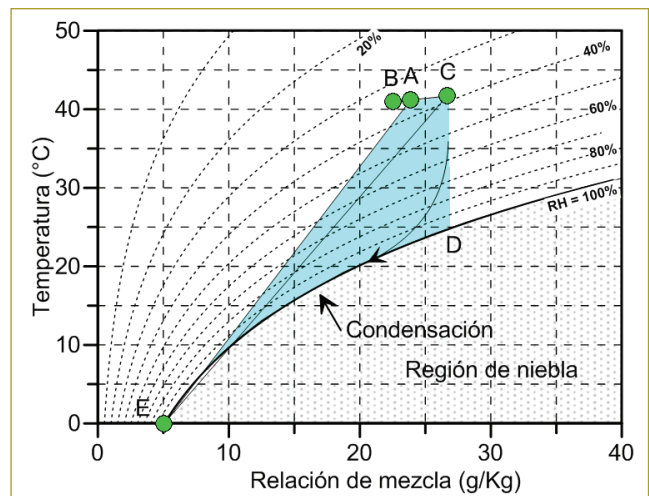


Figura 11. Ciclo termodinámico aplicado por las placas de enfriamiento y los calentadores. Ensayo T2 con radiación infrarroja.

La tasa de evaporación del agua depende de todas las variables ambientales. A medida que la humedad relativa disminuye y la temperatura se incrementa con la radiación solar, la capacidad de la atmósfera de contener agua aumenta. Por este motivo, la tasa de evaporación es mayor para el ensayo T2 que para el ensayo T3 (figura 12).

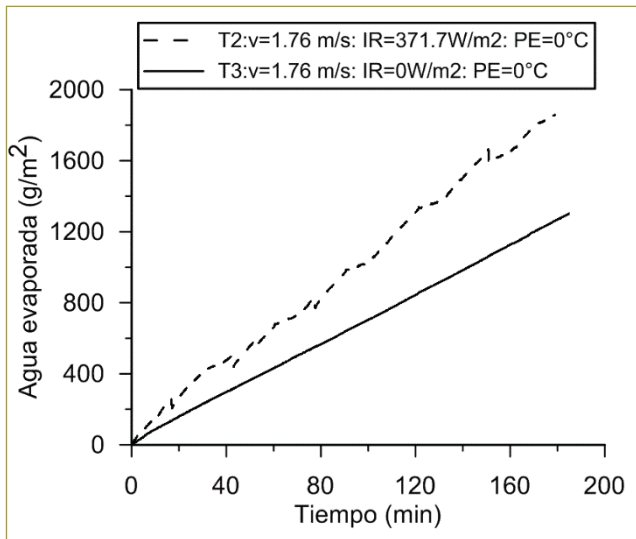


Figura 12. Efecto de la radiación infrarroja en la tasa de evaporación del agua.

Ensayos de evaporación en arcilla

Para determinar la tasa de evaporación real se hicieron los ensayos T2 y T3 en arcilla, manteniendo las mismas condiciones climáticas y realizando el mismo procedimiento experimental que en los ensayos en agua. El suelo utilizado en esta investigación es el caolín Speswhite, preparado con un contenido de humedad de $w = 1,5$ LL. El límite líquido de la arcilla es $LL = 55\%$ y por lo tanto el contenido de humedad inicial es de $w_0 = 82,5\%$.

A continuación se muestra el peso del agua evaporada durante el ensayo (figura 13). Al inicio del ensayo la tasa de evaporación real presenta el mismo valor que la tasa de evaporación potencial. Sin embargo, a medida que el agua se evapora la tasa de evaporación disminuye, hasta que el suelo se encuentra completamente seco. Este comportamiento está asociado con las restricciones del flujo de agua por evaporación debidas al aumento de la succión en el suelo, con la disminución del contenido de humedad.

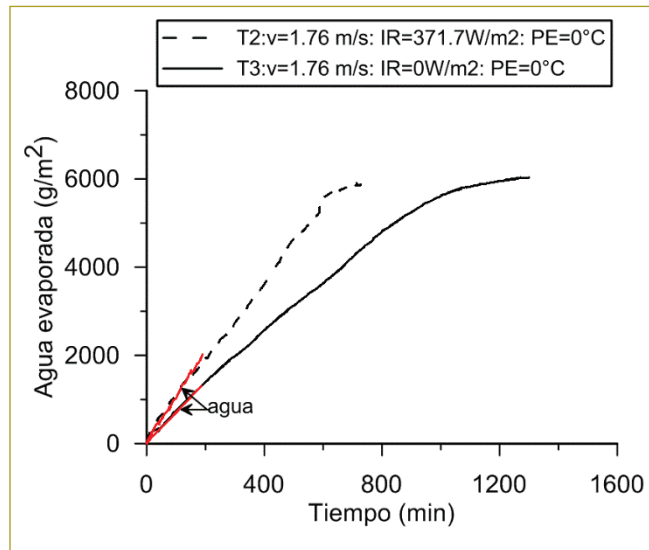


Figura 13. Comparación entre las tasas de evaporación potencial y real.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La cámara de simulación climática se diseñó para hacer ensayos de evaporación en arcilla. Esta cámara permite imponer diferentes condiciones ambientales a través de un circuito de aire cerrado. Los resultados preliminares de evaporación permiten establecer las siguientes conclusiones:

- El principal efecto de la radiación infrarroja en la tasa de evaporación es la disminución de la humedad relativa del aire y el aumento de la temperatura. Estas condiciones y la elevación de la temperatura del agua permiten incrementar la tasa de evaporación.
- La tasa de evaporación en el suelo es la misma que la del agua al inicio del ensayo de evaporación. Sin embargo, a medida que la desecación aumenta, la tasa de evaporación disminuye.
- Los valores de velocidad del viento simulados son inferiores a los valores reales en la sabana de Bogotá. Mayor cantidad de ventiladores o mayores potencias eléctricas son necesarias para simular mayores velocidades de viento.
- El estudio del proceso de evaporación en capas de suelo finas deja un resultado válido experimentalmente, pero para el estudio de mayores profundidades de suelo la cámara climática, a una gravedad, no provee información real del comportamiento del suelo.

Dados los resultados experimentales, un campo de estudio real en el suelo de la Escuela Colombiana de Ingeniería permitiría analizar el proceso de evaporación del suelo en condiciones climáticas reales. Adicionalmente, se podrá estudiar el patrón de fisuras y su relación con las variables climáticas.

REFERENCIAS

- Blight, G.E. (2002). *Measuring evaporation from soil surfaces for environmental and geotechnical purposes*, 28(4), 381-394. <https://doi.org/10.4314/wsa.v28i4.4911>.
- Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S.A., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R. & Skuce, A. (2013). *Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature*, 8(2).
- Corte, A.E. & Higashi, A. (1964). Experimental research on desiccation cracks in soils. Retrieved from <http://trid.trb.org/view.aspx?id=136592>.
- Doran, P.T. & Zimmerman, A.K. (2009). Examining the scientific consensus on climate change, 90(3).
- Garnier, J., Gaudin, C., Springman, S.M., Culligan, P.J., Goodings, D.J., König, D., ... Thorel, L. (2007). Catalogue of Scaling Laws and Similitude Questions in Geotechnical Centrifuge Modelling, 7, 1-1-23-23. <https://doi.org/10.1680/ijpmg.2007.7.3.01>.
- Gill, S.E., Handley, J.F., Ennos, R. & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure, 33(1), 115-133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>.
- Gitirana, G., Fredlund, M.D. & Fredlund, D.G. (2006). Numerical modelling of Soil-atmosphere interaction for Unsaturated Surfaces, 147(1), 658.
- Harris, R.C. (2004). *Giant Desiccation Cracks in Arizona*, 34(2), 4-6.
- IPCC (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report. *Climate Change 2014 Synthesis Report*, 1-151.
- Kodikara, J.K., Nahlawi, H. & Bouazza, A. (2004). *NOTE / NOTE Modelling of curling in desiccating clay*, 566, 560-566. <https://doi.org/10.1139/T04-015>.
- Lozada, C., Caicedo, B. & Thorel, L. (2016). *Improved climatic chamber for desiccation simulation* (p. 13002).
- Oreskes, N. (2004). *The scientific consensus on climate change*, 306(5702), 1686-1686.
- Penman, H. (1948). *Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass* (vol. 193, pp. 120-145). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Randolph, M.F. & House, A.R. (2001). *The complementary roles of physical and computational modelling*, 1(1), 1-8.
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., ... Zhang, X. (2012). *Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment*, 109-230.
- Sheffield, J., Wood, E. & Roderick, M. (2012). *Little change in global drought over the past 60 years*, 491(7424), 435-438.
- Shin, H. & Santamarina, J.C. (2011). *Desiccation cracks in saturated fine-grained soils: particle-level phenomena and effective-stress analysis*, 61(11), 961-972. <https://doi.org/10.1680/geot.8.P012>.
- Suárez-Plascencia, C., Escalona-Alcázar, F. & Díaz-Torres, J. (2005). Desarrollo de grietas en el fraccionamiento Prados de Nextipac, municipio de Zapopán, Jalisco, 25(2), 352-362.
- Taylor, R.E. (2003). *Geotechnical centrifuge technology* (CRC Press).
- Vesga, L.F., Caicedo, B. & Mesa, L. (2003). Deep Cracking in Sabana de Bogotá Clay.
- Wilson, G.W., Fredlund, D.G. & Barbour, S.L. (1994). Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation, 31(2), 151-161. <https://doi.org/10.1139/t94-021>.

Construcción de ventanas con aislamiento termoacústico, mediante una estrategia basada en proyectos

Building thermo-acoustically insulated windows through a project-based strategy

HEINDEL RICARDO OTERO ARÉVALO¹ - CARLOS COLLAZOS MORALES² - CÉSAR MORA LEY³ - JAIME ISAZA CEBALLOS¹ - MARTHA PIMIENTA GIRALDO⁴ - LILIANA PEDRAZA VEGA¹⁵

1. Profesores del Departamento de Ciencias Naturales de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
2. Profesor de la Universidad Manuela Beltrán y estudiante del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México.
3. Subdirector Académico del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México.
4. Coordinadora de Investigación de la Vicerrectoría Académica de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
5. Coordinadora de Desarrollo Profesional de la Vicerrectoría Académica de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

heindel.otero@escuelaing.edu.co - carlos.collazos@escuelaing.edu.co - cmoral@ipn.mx - jaime.isaza@escuelaing.edu.co - martha.pimienta@escuelaing.edu.co - liliana.pedraza@escuelaing.edu.co

Recibido: 26/11/2016 Aceptado: 26/03/2017

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

Resumen

La estrategia de aprendizaje basado en proyectos se ha aplicado en el curso de Ondas y Termodinámica con estudiantes de ingeniería de la Escuela Colombiana de Ingeniería en 2014-2 y 2015-1.

La estrategia se centra en el aislamiento tanto térmico como acústico de la vivienda.

Los estudiantes construyen prototipos de bajo costo y utilizan ciclo experimental (predicción, observación, validación).

Esta metodología de enseñanza mejora el aprendizaje de la termodinámica y la acústica.

Palabras claves: aprendizaje basado en proyectos, termodinámica y acústica.

Abstract

The strategy of project-based learning has been applied in the class of Waves and Thermodynamics, for engineering students of Escuela Colombiana de Ingeniería in 2014-2 and 2015-1.

The strategy focuses on thermal and acoustic insulation for housing. Students build low cost prototypes and use the experimental cycle (prediction, observation, validation).

This teaching methodology enhances learning in thermodynamics and acoustics.

Keywords: project-based learning, thermodynamics, acoustics.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la investigación teórica de los conceptos necesarios para una correcta planeación y ejecución de la idea planteada.
- Comprender claramente las necesidades que debe satisfacer una ventana termoacústica.
- Identificar los tipos de materiales más adecuados, económicos y efectivos para lograr el objetivo principal del proyecto, que es el aislamiento termoacústico.
- Hacer las mediciones térmicas y acústicas para analizar los resultados y la efectividad de la ventana elaborada.
- Trabajar, cooperar y compartir ideas en equipo para lograr un buen desarrollo del proyecto con óptimos resultados.

INTRODUCCIÓN

La física también puede enseñarse mediante la construcción de prototipos que van a servir para hacer mediciones experimentales, las cuales pueden hacerse en los laboratorios de física o en salones de clase.

Siguiendo esta metodología de enseñanza, los estudiantes deben construir prototipos que sean de bajo costo y de buena calidad para que, mediante la experimentación, les permita involucrar el modelamiento físico, la teoría de error y el análisis gráfico.

La estrategia se enfoca en un tema: aislamiento térmico y acústico de ventanas para vivienda.

Esta metodología de enseñanza permite incrementar el aprendizaje de los temas correspondientes a ondas y termodinámica, y otros aprendizajes, como la expresión gráfica, la expresión oral y también la escrita.

El aislamiento térmico es la capacidad o propiedad que posee un material para oponerse a la transferencia de energía (calor) por conducción, en tanto que el aislamiento acústico tiene como objetivo brindar la protección frente al ruido, con el fin de evitar molestias que estas ondas mecánicas producen.

Las ventanas suelen ser el elemento más débil de una fachada en lo referente a aislamiento (tanto térmico como acústico). El aislamiento termoacústico de una vivienda depende en gran parte de la capacidad aislante de las ventanas. Por ende, es muy importante una elección adecuada de los componentes para garantizar los niveles mínimos posibles de atenuación de la transferencia de energía y sonido. En el presente proyecto se fusionarán

los dos tipos de aislamientos mencionados (térmico y acústico) utilizando diferentes técnicas y materiales para cumplir los requerimientos de una ventana termoacústica. Además, a lo largo de este artículo se encontrará una investigación previa acerca de la teoría necesaria para el correcto desarrollo y construcción de esta idea.

TRANSFERENCIA DE ENERGÍA TÉRMICA

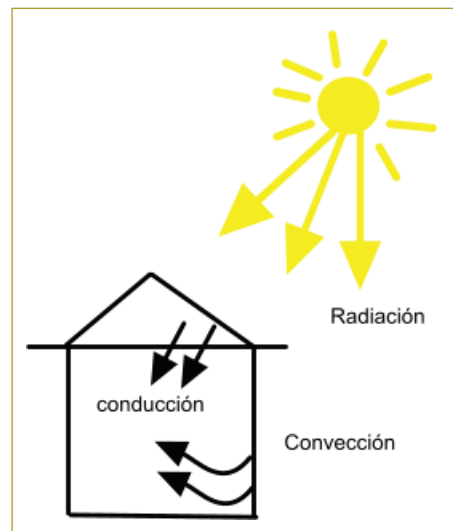


Figura 1. Ejemplo visual de conducción y convección.

Existen tres formas de transmisión de energía térmica de un lugar a otro: conducción, convección y radiación. Ya que en este proyecto se desarrollará una idea de ventanas termoacústicas, el tipo de transferencia de energía en el cual se hará más énfasis será el de conducción.

Conducción

Es una transferencia de energía basada en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, por el que la energía se transfiere de un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que está en contacto con el primero. La propiedad física de los materiales que determina su capacidad de transferencia de energía “para conducir el calor” es la conductividad térmica. La propiedad inversa de la conductividad térmica es la resistividad térmica, que es la capacidad de los materiales para oponerse a la transferencia de energía.

La transmisión de calor por conducción entre dos cuerpos o entre diferentes partes de un cuerpo es el intercambio de energía interna, que es una combinación de la energía cinética y energía potencial de sus partículas. La conductividad térmica de la materia depende de su estructura microscópica: en un fluido se debe, principalmente, a colisiones aleatorias de las moléculas.

Para el caso simplificado de flujo de calor estacionario en una sola dirección, la transferencia de energía de un lado a otro es proporcional al área perpendicular al flujo de calor, a la conductividad del material y a la diferencia de temperatura, y es inversamente proporcional al espesor del material:

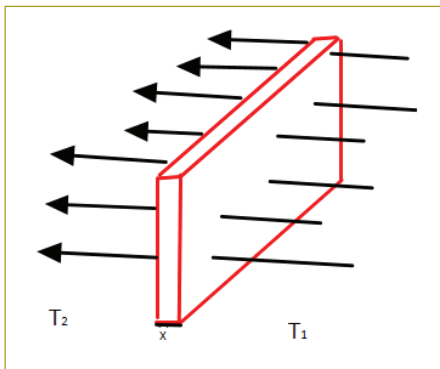


Figura 2. Ejemplo del flujo de calor.

A continuación se presenta la ecuación de transferencia de energía en flujo estacionario, es decir, con temperaturas constantes en los extremos del material.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{kA}{x} (T_1 - T_2)$$

Donde:

$\Delta Q/\Delta t$: transferencia de energía por unidad de tiempo.

k : conductividad térmica del material.

A : área de la superficie de contacto.

$(T_1 - T_2)$: diferencia de temperatura entre el foco caliente y el frío.

Convección

Es el transporte de energía térmica que se realiza con el transporte del propio medio, que puede ser un gas o un líquido.

La convección surge cuando un fluido se calienta por la parte posterior. El fluido, al calentarse, se expande y se eleva, mientras que el fluido más frío se hunde (pasa a la parte posterior). El calor transmitido por convección desde un cuerpo hasta sus alrededores es proporcional al área del cuerpo y a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el fluido en el que se encuentre inmerso.

Radiación

La radiación es la energía transferida por medio de las ondas electromagnéticas. La radiación térmica, las ondas luminosas, las ondas de radio, las ondas de televisión y los rayos X son todas formas de radiación electromagnética y en lo único que difieren es en la longitud de onda o frecuencia.

La ecuación de transferencia de energía por radiación está dada por:

$$H = \sigma e AT^4$$

Siendo A el área del cuerpo radiante, T su temperatura, e la emisividad que depende del cuerpo que está radiando y σ es la constante de Stefan Boltzman.

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{K^4 m^2}$$

De acuerdo con la ley del enfriamiento de Newton: “La velocidad de enfriamiento de un cuerpo es proporcional a la diferencia de temperatura que hay entre el cuerpo (sólido, líquido o gaseoso) y el medio que lo rodea”. La ecuación es la siguiente.

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-kt}$$

RESISTIVIDAD TERMICA, RESISTENCIA TÉRMICA Y MATERIALES AISLANTES

Todos los materiales poseen una propiedad física llamada resistividad térmica, que se define como la capacidad de oponerse al flujo de calor o transferencia de energía que es puramente energía cinética. Es decir, que un mal conductor térmico es aquel que tiene una alta capacidad

de oponerse a que las moléculas de dicho material no reciban energía de otras moléculas cercanas, siendo ésta pura energía cinética.

Lo opuesto a la resistividad térmica es la conductividad térmica, que es la capacidad de los materiales para facilitar el paso del calor o transferencia de energía. Se define como (r) a la resistividad térmica.

$$r = \frac{|\nabla T|}{\dot{q}}$$

Donde:

\dot{q} : flujo de calor (por unidad de tiempo y unidad de área).

∇T : gradiente de temperatura.

La resistencia térmica de un material representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor o transferencia de energía. El nombre de materiales aislantes térmicos hace alusión a la resistencia térmica. Estos materiales establecen una barrera, es decir, que se oponen al paso del calor o transferencia de energía entre dos medios que de una forma natural tenderían a llegar a un equilibrio térmico (esto es, igualarse en temperatura). Ejemplo de ello es una vivienda o una nevera, con el medio ambiente que lo rodea.

Algunos de los materiales aislantes térmicos que serían de mucha utilidad para este proyecto son los siguientes:

Tabla 1

Tipos de materiales con su respectiva resistencia térmica

Materiales aislantes y conductores térmicos	
Material	Conductividad térmica (W/m.°c)
Madera	0,08
Caucho	0,2
Aire	0,023
Poliuretano (espuma)	0,01
Aluminio	238
Hierro	79,5
Vidrio	0,8
Asbesto	0,08

AISLAMIENTO TÉRMICO

El aislamiento térmico es la propiedad que tienen los materiales para oponerse a la transferencia de energía por conducción. Estos materiales se evalúan con la resistencia térmica propia de cada material.

Los metales son buenos conductores térmicos; el ladrillo, el yeso y morteros tienen resistencia térmica media. La fibra de vidrio y el corcho son buenos aislantes térmicos y establecen una gran barrera a la transferencia de energía de un lugar a otro.

El aire y otros gases son elementos de alta resistencia a la transferencia de energía, razón por la cual algunos materiales fibrosos o porosos se emplean como aislantes térmicos. El objetivo de estos materiales es inmovilizar el aire seco y confinarlo en el interior de celdas que ellos poseen, por ser porosos, tales como lana de roca, fibra de vidrio, vidrio celular y poliestireno. Por tanto, una buena elección del material aislante térmico que se va a emplear es una decisión esencial para lograr que un edificio o una vivienda sean confortables y a la vez eficiente en el uso de la energía, debido a que se va a reducir el uso de la climatización de la vivienda.

AISLAMIENTO ACÚSTICO

Las ondas sonoras se definen como ondas mecánicas longitudinales. Se llaman mecánicas porque requieren un medio para propagarse, y longitudinales porque las partículas del medio oscilan en la misma dirección de propagación de la onda. Las ondas sonoras pueden propagarse en un medio sólido, líquido o gaseoso. Estas ondas necesitan un medio transmisor, así como un receptor o detector de sonidos. Una onda mecánica longitudinal es sonora cuando la percibimos como sonido a través de los oídos. Estas ondas sonoras se encuentran en un rango de frecuencia de oscilación entre 16.000 y 20.000 Hz.

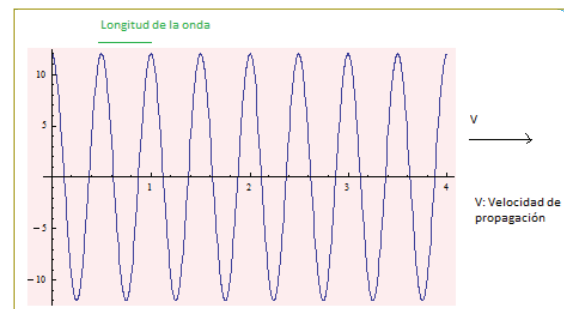


Figura 3. Imagen de una onda con sus características.

- Ondas infrasónicas. Son las ondas que tienen frecuencias más bajas que las audibles.
- Ondas ultrasónicas. Son las ondas que tienen frecuencias más altas que las audibles.

Todas las ondas tienen una velocidad de propagación.

El sonido se propaga con mayor velocidad en los medios más rígidos (metales, por ejemplo). Por lo tanto, la velocidad de propagación es mayor en los sólidos que en líquidos y gases.

El oído humano puede detectar sonidos de una intensidad mínima de 10^{-12} W/m^2 . Sonidos con intensidad igual o mayor que 1 W/m^2 son ondas audibles, pero provocan dolor en los oídos.

Nivel sonoro

Se define el nivel de una onda sonora como $\beta = 10 \log (I/I_0)$. Los valores del nivel sonoro se miden en decibelios (dB). Se llama I a la intensidad de la onda sonora. I_0 : nivel de referencia de la intensidad mínima o umbral 10^{-12} W/m^2 .

MATERIALES AISLANTES ACÚSTICOS

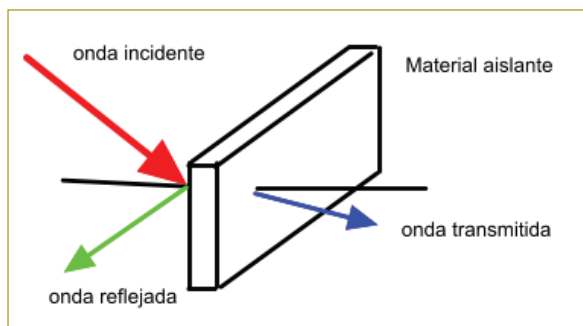


Figura 4. Ejemplo de reflexión y transmisión de una onda.

Un material con propiedades de aislante acústico debe absorber en buen porcentaje las ondas sonoras que inciden sobre dicho material.

Existen varios materiales que absorben una gran cantidad de energía de las ondas sonoras, debido a que hay una disminución al comparar en decibeles el sonido antes del material y el sonido después del material.

AISLAMIENTO TERMOACÚSTICO

Se refiere a un conjunto de materiales, técnicas y tecnologías desarrolladas para disminuir la transferencia de energía y atenuar el nivel sonoro. Para este caso se van a utilizar materiales adecuados y algunas técnicas necesarias para la elaboración de una ventana, de tal modo que aisle lo máximo posible el medio exterior del interior, tanto acústica como térmicamente.

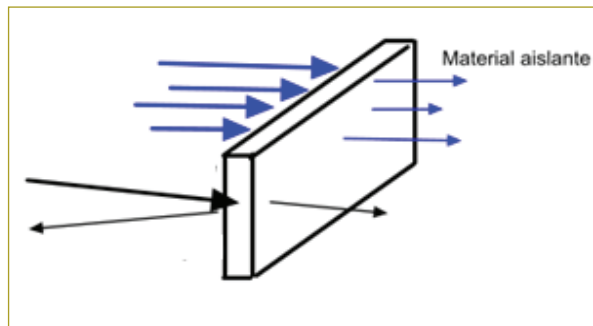


Figura 5. Ejemplo del flujo de calor a través de una ventana de doble vidrio.

PLANTEAMIENTO Y EJECUCIÓN DE LA VENTANA TERMOACÚSTICA

Materiales

Los materiales escogidos para la construcción de una ventana termoacústica son:

- Caja de madera de 2 cm de grosor.
- Tres placas de vidrio de 5 mm de grosor.
- Icopor.
- Láminas de corcho.
- Silicón.

Tomando en cuenta la información anterior, se ha decidido construir una ventana termoacústica de triple vidrio, con una cámara de aire de 5 mm en la mitad de las placas. Para un mayor aislamiento, sobre todo térmico, el borde de la ventana se fijará a la pared (en este caso, caja de madera) con un marco de icopor (material plástico de poliestireno expandido), de tal manera que no entren aire ni ruido del exterior. Aparte, con el silicón, el borde de la ventana se reforzará con este material (el silicón está hecho a base de polímeros, que son buenos aislantes). La ventana se fijará a una caja de madera, en la cual también se construirá un sistema aislante para reforzar un poco más el aislamiento termoacústico del

interior de la caja; dicha caja tendrá una cara cubierta con la ventana de vidrio, que permite la vista al interior. Además, se considerarán factores como la resistividad y la conductividad, para tener un correcto diseño y elaboración de la cámara aislada.



Figura 6. Ejemplo de una ventana de doble vidrio, con marco hecho en PVC.

Medidas de la caja

- Cubo de aristas 25 x 25 x 25 cm
- Marco de la ventana de 2,5 cm
- Tres vidrios de 21 x 21 cm
- Separación entre los tres vidrios (cámara de aire) de 5 mm.

Elaboración de la caja

Se marcan las medidas necesarias sobre la madera para hacer los cortes y armar el cubo que servirá de soporte para encajar la ventana.

Después de realizar los cortes, se atornilla la caja (sin base y sin tapa). Por medio de una rendija de 3 mm de grosor en la base, se encaja un tríplex que haría el papel de tapa movable.

Luego, por medio de tres rendijas sobre el marco, se encajan los tres vidrios con su respectiva separación (cámara de aire). Este marco se atornilló perfectamente sobre la caja.

Por último, se hacen los refuerzos en el interior de la caja con una capa de corcho y una capa de icopor, en el borde del vidrio se aplica silicón para rellenar cualquier espacio, se pega un marco o borde de icopor y se hace la perforación para los cables.

Costo de la caja (materiales y mano de obra)

45 dólares.

Imágenes de la caja

- Frente:



- Parte superior:



- Parte inferior:



- Interior y tapa de la caja:



- Interior de la caja:



PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Medida del nivel sonoro

- Se produce un ruido fuera de la caja y se mide el nivel sonoro tanto fuera como dentro de la caja. El nivel sonoro dentro de la caja se mide con el medidor cercano a la ventana.

Medida de temperatura

- Se pone hielo a cero grados centígrados en el vidrio exterior de la ventana. Las demás paredes de la caja se encuentran a temperatura ambiente.
- Se mide la temperatura en el centro de la caja cada cinco minutos desde el momento en que se registra una disminución de la temperatura dentro de ella.

MEDICIONES

A continuación se presentan los resultados obtenidos al probar la calidad termoacústica de la caja:

Tabla 2
Mediciones acústicas

Frecuencia (Hz)	Ruido adentro (dB)	Ruido afuera (dB)	Atenuación de ruido (dB)	Porcentaje de atenuación
1003	70	105	35	34
2004	75	102	27	26
3013	70	105	35	34
4008	68	105	38	36
5035	74	113	39	35
6047	68	109	41	38
7070	65	109	44	41
8056	65	108	43	40
9016	68	106	38	36
10.083	65	100	35	35

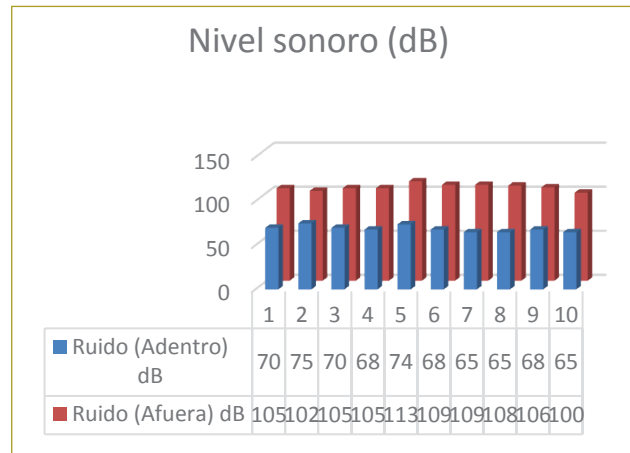


Gráfico 1. Representa el nivel sonoro fuera y dentro de la caja, para las diferentes frecuencias.

Tabla 3
Mediciones térmicas

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	23,5
10	23,1
15	22,8
20	22,3
25	21,9
30	21,4
35	21,0
40	19,8
45	19,5
50	19,0
55	18,4
60	17,7

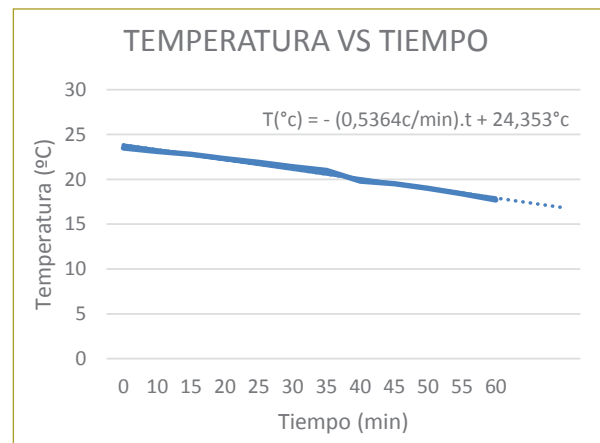


Gráfico 2. Temperatura en función del tiempo dentro de la caja.

ANÁLISIS DE DATOS

Se considera que la atenuación es buena a partir del 30 %. Cuanto mayor sea el porcentaje de atenuación, mejor ha sido el aislamiento acústico. Como se evidencia en la tabla 2, la atenuación se encuentra sobre 30 %, con un promedio de 35,5 %, de lo cual se concluye que el aislamiento acústico de la caja es muy bueno.

Por otro lado, se obtuvieron las mediciones térmicas que se encuentran en la tabla 3 y se observa el comportamiento de ésta en el gráfico 2, que indica “tiempo vs. temperatura”, en la que se presenta la transferencia de energía en el espacio determinado, es decir, dentro de la caja termoacústica. De este gráfico podemos concluir que el aislamiento térmico no es muy bueno.

La temperatura inicial es de 23,5 °C, que equivale al 100 % de la temperatura ambiente en el interior de la caja. Una vez conocido este dato, la caja es sometida a un enfriamiento en el cual se utilizó hielo que se encontraba en la parte exterior de la caja; esto se realizó con el fin de observar si los materiales utilizados en la producción de la caja termoacústica son aptos a la hora de oponerse a la transferencia de energía por conducción, y se observa que al transcurrir diez minutos se da una disminución de temperatura de 0,4 °C, que equivale a la diferencia porcentual con respecto a la inicial del 1,71 %.

Se puede concluir que los materiales utilizados son aptos, pero este mismo análisis se debe aplicar para cada uno de los datos obtenidos en el laboratorio, por lo que se realizó el contraste de los datos inicial y final, en el cual se obtuvo que la diferencia de temperatura es de 5,8 °C, que equivale a la diferencia porcentual con respecto a la inicial de 24,68 %.

Los anteriores valores confirman que el aislamiento térmico no es tan eficaz debido a que presenta un cambio drástico en la temperatura, es decir, temperaturas muy bajas a un corto tiempo; por ende, de acuerdo con la ecuación, existe una relación de $-0,5364$ (de pendiente muy alta) entre la temperatura y tiempo. La pendiente

de $0,5364$ °C/min está diciendo que la temperatura dentro de la caja disminuye a razón de $0,5364$ °C por cada minuto, hasta llegar al equilibrio térmico entre el aire interno de la caja y el hielo que se encuentra afuera.

CONCLUSIONES

Las ventanas termoacústicas pueden ser la solución a varios problemas, ya que el ruido muchas veces es molesto, produce desconcentración y otras alteraciones; además, en distintos espacios se requiere un control de transferencia de energía que sea muy bueno para algún trabajo o requerimiento de las personas.

Aunque los resultados obtenidos han sido buenos, es importante mencionar que fue algo complejo decidir con qué materiales hacer el prototipo, pues en la mayoría de los casos los aislantes térmicos no son aislantes acústicos; tal vez esta fue una barrera para no obtener resultados excelentes, y en la construcción de la caja termoacústica se vivenció este factor, ya que por medio de las mediciones realizadas en la práctica o laboratorio se encontró que esta caja era apta para el aislamiento acústico debido a que la atenuación está sobre 30 %, con un promedio de 35,5 %.

Por otra parte, también se pudo determinar que esta caja no es eficaz para el aislamiento térmico debido a que su temperatura disminuye rápidamente en un tiempo muy corto.

REFERENCIAS

- [1] Aislamiento térmico y acústico. Disponible en <http://www.atefuer.es/aislamientos-termicos-acusticos/>.
- [2] Ondas sonoras. Disponible en http://www.fisicanet.com.ar/fisica/sonido/ap03_sonido.php.
- [3] Serway, R. (2013). *Fundamentos de física* (7.ª ed., vol. 1). Bogotá: Cengage Learning.
- [4] Young, H.D., Freedman, R. & Ford, L. (2009). *Física universitaria de Sears y Zemansky* (11.ª ed., vol. 1). México: Pearson Educación.

Calidad del agua en las cuencas de los ríos Blanco, Une y Guatiquía para la evaluación regional del agua (ERA)

Water quality in the basins of Blanco, Une, and Guatiquía Rivers for the Regional Water Evaluation (RWE)

YULY ANDREA SÁNCHEZ LONDOÑO

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, D.C., Colombia.

yuly.sanchez@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/01/2017 Aceptado: 14/04/2017

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

Resumen

En este artículo se presentan los resultados del estudio realizado para la evaluación regional del agua (ERA) por la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB) de las cuencas de los ríos Blanco, Une y Guatiquía, donde se seleccionaron puntos de monitoreo para determinar la calidad del agua en relación con parámetros físicos, químicos y microbiológicos, y establecer los indicadores de índice de calidad del agua (ICA), Water Quality Index (WQI) e índice de alteración potencial de la calidad del agua (Iacal).

Los resultados se compararon con la normativa vigente de objetivos de calidad nacional, y se encontró que la calidad del agua de las cuencas rurales, como los ríos Blanco, Une y Guatiquía, tiene un índice de alteración potencial de contaminación alto, por el alto contenido de nitrógeno y fósforo, producto de la agricultura.

La determinación de los indicadores de calidad del agua de la ERA llevó a establecer el estado actual de la calidad del agua de las cuencas.

Palabras claves: calidad, ERA, ICA, WQI, IACAL.

Abstract

This article shows the results of the study performed for the Regional Water Evaluation (RWE) by the Water and Sewage Company of Bogotá (EAAB) on the basins of Blanco, Une, and Guatiquía Rivers, where monitoring spots were chosen to determine water quality regarding physical, chemical, and microbiological parameters, and establish the Water Quality Index (WQI) and Potential Water Quality Alteration Index (PWQAI) indicators.

Keywords: Quality, RWE, WQI, PWQAI.

INTRODUCCIÓN

La determinación de la calidad del agua de las cuencas de estudio corresponde al río Blanco, entre la confluencia de la quebrada Quisquiza y la confluencia con el río Negro, antes de la confluencia con el río Cáqueza; además, las quebradas La Horqueta 1 (pozo 4), La Cortadera (pozo 1), Piedras Gordas (pozo 3) y Palacio Buitrago (pozo 2); al río Une, desde su nacimiento hasta aguas abajo de la confluencia del río Guatavita, y al río Guatiquía, desde la compuerta (sitio de captación) hasta la estación San Luis.

La calidad del agua en la evaluación regional del agua (ERA) se estableció a través de los indicadores del ICA, Iacal y WQI, de conformidad con registros históricos y puntos de monitoreo concertados con la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB), para determinar el estado actual de la calidad del agua.

Para calcular los indicadores se consultaron redes de monitoreo de cada una de las cuencas, con el fin de determinar los índices históricos y compararlos con las campañas de monitoreo; se presentó una calidad entre regular, buena y excelente para las partes alta, media y baja en el ICA y WQI, en tanto que en el caso del Iacal se halló un alto contenido de nitrógeno y fósforo, producto de la agricultura.

METODOLOGÍA

Selección de puntos de monitoreo

Se seleccionaron puntos de monitoreo en las cuencas de estudio, según los siguientes criterios:

Cartográfico

Se identificaron varios puntos de monitoreo por cartografía, de acuerdo con el área de cada una de las cuencas y sus subsectores (cuencas alta, media y baja).

De campo

Una vez identificados cartográficamente los posibles puntos de monitoreo de cada una de las cuencas, en terreno se tomaron en cuenta facilidad de acceso a los puntos identificados de monitoreo, características específicas de las masas de agua para la representatividad

de la muestra y aguas abajo de zonas de mezcla dadas por vertimientos importantes.

Basados en los puntos preliminares identificados con la cartografía, se hicieron visitas de campo del 14 al 29 de enero de 2016, en cada una de las cuencas de estudio.

Campañas de monitoreo

Se realizaron tres campañas de monitoreo; la primera, desarrollada en condiciones hidrológicas secas, se llevó a cabo en el periodo comprendido entre el 29 de febrero y el 10 de marzo de 2016, en un muestreo específico hecho en cada uno de los puntos de monitoreo descritos más adelante; la segunda, efectuada en condiciones hidrológicas de lluvia, se realizó del 18 al 27 de abril de 2016, en los mismos puntos descritos en la campaña 1, y la tercera, realizada en condiciones hidrológicas de lluvia, se llevó a cabo del 23 de mayo al 2 de junio de 2016, en los mismos puntos de la campaña 1.

A continuación se presenta la localización de los puntos de monitoreo de las cuencas de estudio (tabla 1, y figuras 1, 2 y 3).

Tabla 1
Puntos de monitoreo

Cuenca	Nombre	Norte	Este
Guatiquía	Descarga río Frío	992850,55	1036502,222
	Descarga San Luis de Toledo	987516,683	1046030,713
	Captación San José	993567,304	1038715,227
	Guatiquía Batea	993915,784	1035012,835
Blanco	Quebrada Cortadera, pozo 1	1011528,716	1025888,721
	Quebrada Palacio Buitrago, pozo 2	1012232,002	1025457,024
	Quebrada Piedras Gordas, pozo 3	1013515,679	1013515,679
	Quebrada Horqueta, pozo 4	1013506,001	1022991,148
	Desembocadura río Negro	989763,679	1019388,161
	Puente Medina	995329,324	1018104,49
	Llanadas	999623,703	1018618,269
Une	Vereda Combura	977290,307	1001964,873
	Vereda Hoyas	980807,815	1008581,043
	Descarga Cáqueza	979810,358	1014599,366
	Balneario	980028,002	1011802,958

Fuente: EAB-Consortio Hidrocuencas, 2016.

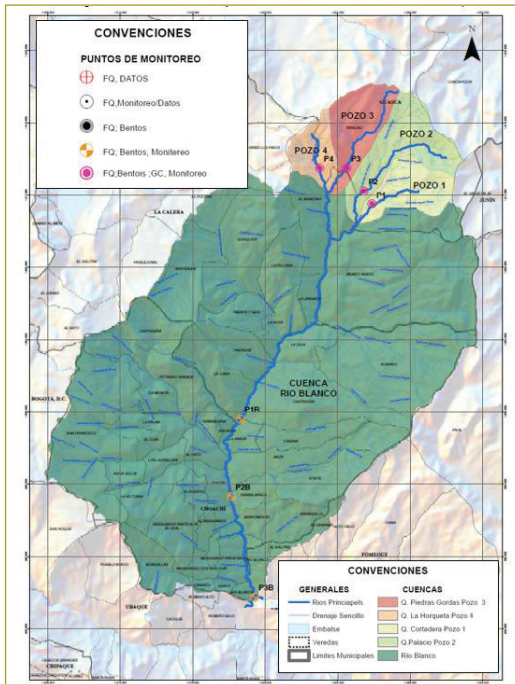


Figura 1. Localización de los puntos de monitoreo en la cuenca del río Blanco.

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas, con base cartográfica del IGAC (2016).

Toma de muestras

Las muestras puntuales tomadas en campo para cada una de las cuencas en estudio se refrigeraron para su preservación hasta el final del monitoreo, siguiendo los protocolos del Laboratorio Consultoría y Servicios Ambientales CIAN Ltda., el Laboratorio Ambiental CAR y las guías de monitoreo del Ideam.

En cada uno de los puntos de monitoreo se tomaron las muestras de parámetros físicos, químicos y microbiológicos de DBO_5 , DQO, SST, P_{T_P} , N_{T_P} , G y A, SAAM y CF, para llevarlos al laboratorio. *In situ*, se tomaron valores de $T^{\circ}C$, CE, pH y OD. Sólo en ciertos puntos se tomaron valores de *Giardia* y *Cryptosporidium*.

Índices de calidad del agua

Índice de calidad del agua (ICA). El ICA es un número (entre 0 y 1) que señala el grado de calidad de un cuerpo de agua en términos del bienestar humano, independiente de su uso (Ideam, s.f.).

Metodología de cálculo. El ICA se calcula a partir de los datos de concentración de ocho parámetros (OD, SST, DQO, CE, N_{T_P} , P_{T_P} , pH y CF), a los cuales se les asigna un valor que se extrae de gráficas o ecuaciones de calidad, entre un rango de 0 – 1. El índice se calcula como la multiplicación ponderada de los parámetros, de acuerdo con lo presentado en el ENA 2010 (Ideam, 2010), así:

$$ICA = \sum 0,16I_{OD} + 0,14I_{SST} + 0,14I_{DQO} + 0,14I_{CE} + 0,14IN_{T/P} + 0,14I_{pH} + 0,14I_{CF}$$

Obtenido el valor de los índices, se calcula el ICA y se califica de acuerdo con la matriz de la tabla siguiente (tabla 2).

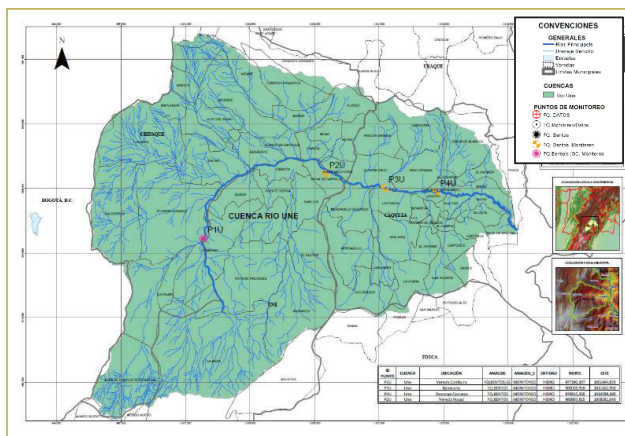


Figura 2. Localización de los puntos de monitoreo en la cuenca del río Une.

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas, con base cartográfica del IGAC (2016).

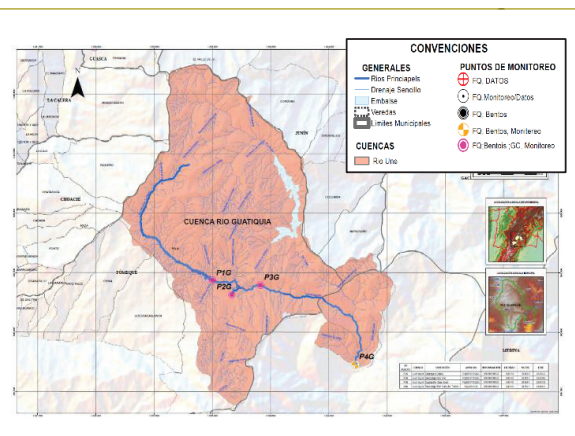


Figura 3. Localización de los puntos de monitoreo en la cuenca del río Guatiquía.

Tabla 2
Matriz de calificación ICA

Calificación ICA		
Mínimo	Máximo	Calificación
0	0,25	Muy mala
0,26	0,50	Mala
0,51	0,70	Regular
0,71	0,90	Aceptable
0,91	1,00	Buena

Fuente: ENA 2010 (IDEAM, 2010).

Water Quality Index (WQI). El índice de calidad CCME-WQI (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index), creado por el Consejo Canadiense del Ministerio del Medio Ambiente de Canadá, lo utiliza la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) como herramienta para determinar el estado y grado de cumplimiento de los objetivos para los principales ríos de la ciudad de Bogotá.

Metodología de cálculo. El WQI se calcula a partir de los datos de concentración de diez parámetros (OD, DBO₅, DQO, SST, N_T, P_T, pH, SAAM, CF, G y A) (SDA, 2008), así:

$$WQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732} \right)$$

Se calculan entonces las variables F1, F2 y F3, que representan diferentes aproximaciones para determinar la calidad del agua.

Objetivos de calidad del agua. En cuencas urbanas como Bogotá, la Secretaría Distrital de Ambiente determina claramente unos tramos y unos objetivos de calidad del agua por tramo, lo que no se encuentra así definido para las cuencas de los ríos Blanco, Une y Guatiquía; por tal razón, para calcular el WQI se estudiaron varias normas que definen objetivos de calidad genéricos para el agua en todo el país. Sin embargo, estos objetivos no están basados en un histórico ni en el conocimiento profundo del comportamiento de la calidad del agua en las cuencas mencionadas. A renglón seguido se resumen estos objetivos de calidad que se utilizarán para calcular el WQI de las cuencas localizadas fuera de la ciudad de Bogotá (tabla 3).

Una vez determinado el valor del WQI, la calidad del punto que se está evaluando puede calificarse de acuerdo con las categorías que se consignan seguidamente (tabla 4).

Índice de alteración potencial de la calidad del agua (Iacal). El Iacal es un índice que mide la alteración potencial de la calidad del agua en un territorio determinado, a partir de la carga contaminante que se vierte sobre el recurso hídrico en esta área.

Tabla 3

Objetivos de calidad del agua por parámetro para el cálculo del WQI en las cuencas de los ríos Blanco, Une y Guatiquía

Parámetro	Unidades	Tramo		
		I: Cuenca alta	II: Cuenca media	III: Cuenca baja
OD	mg/L	5 **	4 **	2***
DBO ₅	mg/L	90*	90*	70*
DQO	mg/L	180*	180*	150*
N total	mg/L	1,5***	10 ***	10 ***
P total	mg/L	0,1***	1***	1***
SST	mg/L	90*	90*	70*
A Y G	mg/L	20*	20*	10*
Coliformes fecales	NMP/100 mL	100 ***	2000 **	2000**
pH	Unidad	6-9*	6-9*	6-9*
SAAM	mg/L	0,5 **	0,5 **	0,5**

* Valor tomado del Decreto 631 de 2015.

** Valor tomado del Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.3.3.9.10. Criterios de calidad para preservación de flora y fauna. Artículo 2.2.3.3.9.3. Criterios de calidad del agua para consumo humano y doméstico.

*** Valor tomado de la Resolución 5731 de 2008, expedida por la SDA.

Tabla 4
Matriz de calificación del WQI

Mínimo	Máximo	Calificación
0	44	Pobre
45	64	Marginal
65	79	Regular
80	94	Buena
95	100	Excelente

Fuente: SDA, 2008.

Metodología de cálculo. El Iacal se calcula de acuerdo con la metodología planteada por el Ideam en las referencias (Ideam, 2010; Ideam, 2014), esto es, tomando en cuenta las cargas contaminantes de sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno total (N_T) y fósforo total (P_T), medidas en toneladas/año que se generan en una cuenca determinada. Al conocer las cargas contaminantes existentes de estos cinco parámetros en las cuencas objeto de estudio, al igual que la oferta de agua disponible en esta área, se logra calcular, en una escala de 1 a 5, qué tan susceptible es el agua disponible de ser contaminada con estos agentes. A continuación, se muestran las calificaciones que pueden obtenerse después de calcular el Iacal (tabla 5).

Tabla 5
Índice de calificación del Iacal

Calificación	Iacal cualitativo
1	Baja
2	Moderada
3	Media alta
4	Alta
5	Muy alta

Fuente: Ideam, s.f.

Para calcularse debe determinarse la carga contaminante total (K), expresada en toneladas/año en cada territorio, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$K = K_p + K_{IND} + K_C + K_{SG} + K_Z$$

Donde:

- K_p: carga contaminante proveniente de la población en t/año.
- K_{IND}: carga contaminante proveniente de la industria en t/año.
- K_C: carga contaminante proveniente del beneficio del café en t/año.
- K_{SG}: carga contaminante proveniente del sacrificio de ganado en t/año.
- K_Z: carga contaminante proveniente de otras actividades económicas en t/año.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la cuenca del río Blanco

Pozo 1, pozo 2, pozo 3 y pozo 4

ICA. Los resultados históricos de los datos del ICA corresponden al periodo 2012-2015, en el que el comportamiento histórico de la parte alta de la cuenca del río Blanco es casi similar para toda la cuenca en todos los periodos, mientras que para las partes media y baja no se poseen datos históricos de la cuenca (tabla 6).

La quebrada Cortadera - pozo 1 es el único punto de la cuenca donde se tiene una calidad del agua aceptable, pero en los otros pozos hay un agua de buena calidad donde se conservan las condiciones naturales, debido a que corresponde a un área resguardada por Parques Nacionales Naturales de Colombia y la EAB.

Tabla 6
Resultados del ICA en la cuenca del río Blanco, pozos año 2012

N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	ICA numérico	ICA cualitativo
1	Q. Cortadera - pozo 1	I	2012	I y II	0,88	Aceptable
2	Q. Palacio Buitrago - pozo 2	I	2012	I y II	0,94	Buena
3	Q. Piedras Gordas - pozo 3	I	2012	I y II	0,92	Buena
4	Q. La Horqueta - pozo 4	I	2012	I y II	0,93	Buena

Fuente: EAB-Consortio Hidrocuenas.

Tabla 7

Resultados del ICA en la cuenca del río Blanco, promedio campañas

Cuenca		Río Blanco	Resumen ICA, promedio			
N.º	Punto	Fecha	Año	Semestre	ICA numérico	ICA cualitativo
1	Q. Cortadera - pozo 1	-	2016	I	0,753	Aceptable
2	Q. Palacio Buitrago - pozo 2	-	2016	I	0,780	Aceptable
3	Q. Piedras Gordas - pozo 3	-	2016	I	0,851	Aceptable
4	Q. Horqueta - pozo 4	-	2016	I	0,819	Aceptable
5	Blanco CPA	-	2016	I	0,757	Aceptable
6	Llanadas	-	2016	I	0,777	Aceptable
7	Puente Medina	-	2016	I	0,746	Aceptable
8	Desembocadura río Negro	-	2016	I	0,744	Aceptable

Fuente: EAB-Consortio Hidrocuencas.

El ICA calculado para las tres campañas de monitoreo varió el comportamiento con lo presentado en lo histórico, donde los puntos monitoreados de la parte alta registran una calidad aceptable, al igual que en sus partes media y baja (tabla 7).

WQI. Los resultados históricos de los datos del WQI corresponden al periodo 2010-2015, donde el comportamiento histórico es casi similar para toda la cuenca en todos los periodos (tabla 8).

El resultado es un agua de calidad buena y excelente, según el WQI. En los casos donde no se obtiene un agua de excelente calidad, se debe a que el nitrógeno total y los coliformes fecales no cumplen con el objetivo de calidad, que es muy exigente. Los demás parámetros cumplen con los objetivos de calidad.

El WQI calculado para las tres campañas de monitoreo presenta un comportamiento muy diferente.

Los puntos monitoreados en la parte alta de la cuenca registraron una variabilidad entre excelente y regular, en tanto que los puntos monitoreados en las partes media y baja tuvieron una calidad excelente (tabla 9).

La calificación del WQI en la parte alta de la cuenca se ve afectada por el alto contenido de nitrógeno y la presencia de coliformes fecales. En las cuencas media y baja se encuentra un agua de similares características, pero la norma es menos exigente, por lo que se cumplió en todo momento con el estándar de calidad escogido.

Iacal. Para calcular el indicador se utilizó información secundaria de acuerdo con los municipios del área de influencia de la cuenca, analizándolos desde la carga poblacional, de agricultura y de sacrificio de ganado, debido a que en esta zona no se reportaron cultivos de café, industria y otras actividades económicas (tabla 10).

Tabla 8

Resultados del WQI en la cuenca del río Blanco, año 2012

Cuenca		Torca	Resumen WQI, año 2015			
N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	WQI numérico	WQI cualitativo
1	Q. Cortadera - pozo 1	I	2012	I y II	93,9	Buena
2	Q. Palacio Buitrago - pozo 2	I	2012	I y II	100	Excelente
3	Q. Piedras Gordas - pozo 3	I	2012	I y II	100	Excelente
4	Q. La Horqueta - pozo 4	I	2012	I y II	100	Excelente

Fuente: Consorcio Hidrocuencas.

Tabla 9
Resultados del WQI en la cuenca del río Blanco, primer semestre de 2016

N.º	Cuenca		Resumen WQI, periodo 2016 I, campañas de monitoreo			
	Nombre	Río Blanco Sector	Año	Semestre	WQI numérico	WQI cualitativo
1	Q. Cortadera	I	2016	I	73,7	Regular
2	Q. Palacio Buitrago	I	2016	I	74,6	Regular
3	Q. Piedras Gordas - pozo 3	I	2016	I	74,7	Regular
4	Q. Horqueta - pozo 4	I	2016	I	71,5	Regular
5	Blanco CPA	I	2016	I	56,0	Marginal
6	Llanadas	II	2016	I	100,0	Excelente
7	Puente Medina	II	2016	I	100,0	Excelente
8	Desembocadura río Negro	III	2016	I	100,0	Excelente

Fuente: Consorcio Hidrocuenas.

Tabla 10
Resumen de cargas contaminantes en la cuenca del río Blanco

Cargas contaminantes	DBO t/año	DQO t/año	DQO-DBO t/año	SST t/año	N _T t/año	P _T t/año	Total t/año
K _p	130,6	293,8	163,2	195,9	21,8	8,7	520,2
K _{SG}	0,1	0,1	0,1	0,027	-	-	0,2
K _Z	-	-	-	-	532,1	1798,0	2330,1
K	130,7	294,0	163,3	195,9	553,8	1806,7	2850,4

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

A renglón seguido se presentan los resultados del Iacal para los municipios de la cuenca del río Blanco (figura 4).

Se puede apreciar que el municipio con más contaminación es Choachí y que los contaminantes que más generan carga en la cuenca son el nitrógeno y el

fósforo, producto de la agricultura y el uso de fertilizantes, correspondiente a la principal actividad económica de la cuenca. Si bien esta contaminación no llega directamente a ningún vertimiento a los cuerpos de agua, puede llegar como contaminación difusa por escorrentía cuando se presentan lluvias. En la cuenca,

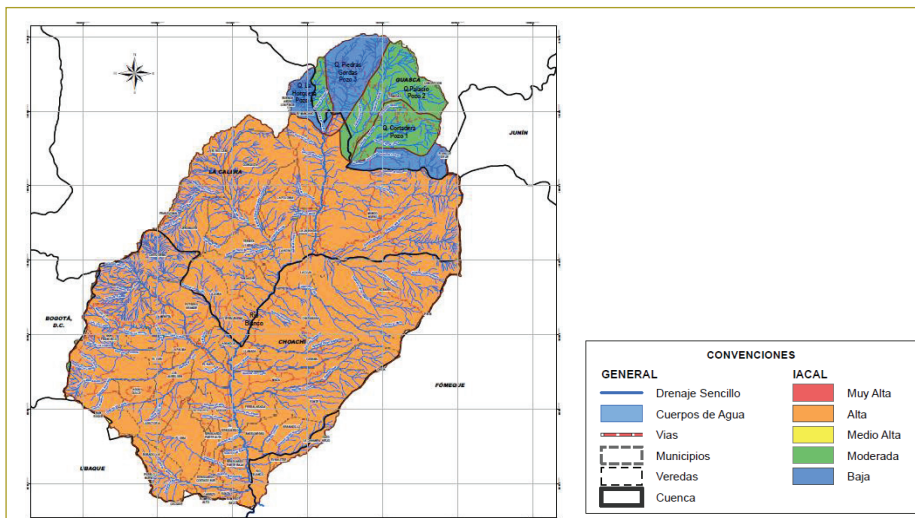


Figura 4. Municipios en la cuenca del río Blanco.

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas, con base cartográfica del IGAC (2004).

Tabla 11
Resultados del ICA en la cuenca del río Une, promedio campañas

Cuenca		Río Une		Resumen ICA, campaña 3		
N.º	Punto	Fecha	Año	Semestre	ICA numérico	ICA cualitativo
1	Vereda Combura	01/06/2016	2016	I	0,725	Aceptable
2	Las Hoyas	01/06/2016	2016	I	0,695	Regular
3	Balneario	01/06/2016	2016	I	0,655	Regular
4	Descarga de Cáqueza	01/06/2016	2016	I	0,637	Regular

Fuente: EAB-Consortio Hidrocuenas.

Tabla 12
Resultados del WQI en la cuenca del río Une, primer semestre de 2016

Punto	Nombre	Sector	Año	Semestre	WQI numérico	WQI cualitativo
1	Vereda Combura	I	2016	I	77,1	Regular
2	Las Hoyas	II	2016	I	100,0	Excelente
3	Balneario	II	2016	I	93,7	Buena
4	Descarga de Cáqueza	II	2016	I	93,8	Buena

Fuente: EAB-Consortio Hidrocuenas.

el Ical resulta variable y se califica entre bajo y muy alto, dependiendo de la concentración de población y de zonas agrícolas, que son las principales fuentes de contaminación potencial al recurso hídrico.

Parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la cuenca Une

ICA. No se reportaron datos históricos por parte de la Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia (Corporinoquia). El ICA calculado para las tres campañas de monitoreo muestra una calidad aceptable en la parte alta de la cuenca y una calidad de regular estado en las partes media y baja (tabla 11).

WQI. El WQI calculado para las tres campañas de monitoreo presenta una calidad regular en la parte alta y entre excelente y buena en las partes media y baja (tabla 12).

Se obtuvo una calificación regular en el primer punto, a pesar de que se tiene un muy buen ICA, debido a que al pertenecer a la cuenca alta se califica con unos objetivos de calidad más exigentes que los demás puntos.

Los parámetros que contribuyeron a obtener un WQI regular fueron el nitrógeno, el fósforo y los coliformes fecales, cuyos objetivos son muy exigentes; en el punto vereda Las Hoyas se obtuvo una calificación perfecta, con unos objetivos de calidad menos exigentes, y en los dos últimos puntos se alcanzó una elevación de la concentración de los sólidos suspendidos totales, lo que hizo que la calificación bajara a buena. En la tercera campaña fue el mayor caudal en los dos últimos puntos, por lo que es natural la resuspensión de sólidos presentes en los sedimentos.

Ical. Para calcular el indicador se utilizó información secundaria de acuerdo con los municipios de la cuenca, analizándolos desde la carga poblacional, sacrificio de ganado y agricultura, debido a que en esta zona no se reportaron cultivos de café, industria y otras actividades económicas. Se describen a continuación todas las variables K necesarias para el cálculo del Ical (tabla 13).

En la página siguiente se presentan los resultados del Ical para los municipios de la cuenca del río Une (figura 5).

Tabla 13
Resumen de cargas contaminantes en la cuenca del río Blanco

Cargas contaminantes	DBO t/año	DQO t/año	DQO-DBO t/año	SST t/año	N _T t/año	P _T t/año	Total t/año
K _P	3242	729,4	405,2	486,1	54,0	24,4	1294,0
K _{IND}	-	-	-	-	-	-	-
K _{SG}	0,03	0,06	0,03	0,01	-	-	0,1
K _C	-	-	-	-	-	-	-
K _Z	-	-	-	-	578,6	1955,1	2533,7
K	324,2	729,5	405,3	486,1	632,6	1979,6	3827,8
K final	324,2	729,5	405,3	486,1	632,6	1979,6	3827,8

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuencas.

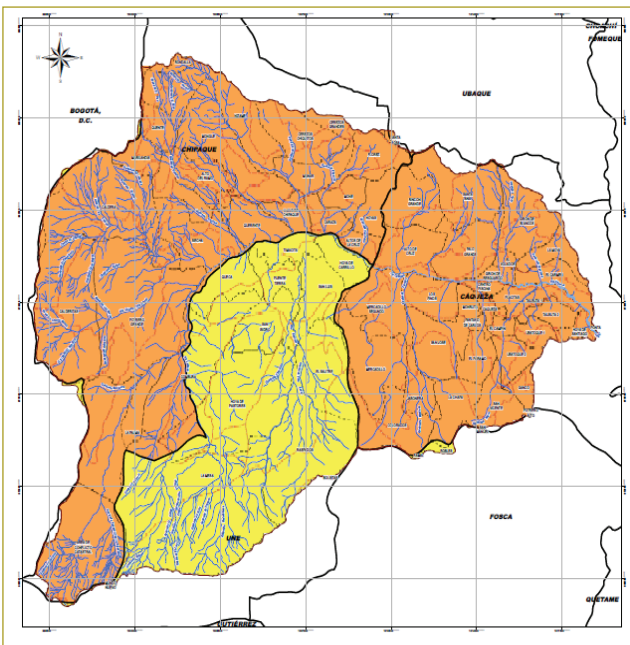


Figura 5. Municipios en la cuenca del río Une.

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuencas, con base cartográfica del IGAC (2004).

Como se puede observar, en todos los municipios de la cuenca de Une el Ical registra valores bajos para

los municipios de Ubaque, Fosca y Bogotá, municipios que tienen un impacto de casco urbano muy bajo en la cuenca, mientras que en los municipios de Cáqueza, Chipaque y Une se observan valores entre alto y medio alto para DBO₅, DQO y SST. Se presentan valores muy altos para N_T y P_T en todos los municipios de la cuenca de Une, generados por la agricultura.

Parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la cuenca del río Guatiquía

ICA. Los resultados históricos de los datos del ICA corresponden al periodo 2010-2012 en algunos puntos monitoreados por la EAB (tabla 14).

Como se puede observar, en los puntos monitoreados por la EAB la calidad del agua es buena. Estos puntos se encuentran dentro del Parque Nacional Natural Chingaza, donde la influencia humana y las fuentes de contaminación son prácticamente inexistentes.

El ICA calculado para las tres campañas de monitoreo presenta una calidad aceptable. El punto de captación difiere de la calidad del dato histórico, que varió de bueno a aceptable (tabla 15).

Tabla 14
Resultados del ICA en la cuenca del río Guatiquía, periodo 2010-2012

N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	ICA numérico	ICA cualitativo
1	Embalse de Chuza, descarga del río Guatiquía	I	2010-2012	I y II	0,96	Buena
2	Río Guatiquía, aguas arriba de la captación	II		I y II	0,94	Buena
3	Río Guatiquía, aguas abajo de la captación	II		I y II	0,96	Buena

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuencas.

Tabla 15
Resultados del ICA en la cuenca del río Guatiquía, promedio campañas

N.º	Punto	Fecha	Año	Semestre	ICA numérico	ICA cualitativo
1	Batea	-	2016	I	0,751	Aceptable
2	Descarga río Frío	-	2016	I	0,774	Aceptable
3	Captación San José	-	2016	I	0,744	Aceptable
4	Descarga San Luis de Toledo	-	2016	I	0,737	Aceptable

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

Tabla 16
Resultados del WQI en la cuenca Guatiquía, periodo 2010-2012

N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	WQI numérico	WQI cualitativo
1	Embalse de Chuza, descarga del río Guatiquía	I	2010-2012	I y II	0,96	Excelente
2	Río Guatiquía, aguas arriba de la captación	II		I y II	0,94	Excelente
3	Río Guatiquía, aguas abajo de la captación	II		I y II	0,96	Excelente

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

WQI. Los resultados históricos de los datos del WQI corresponden al periodo 2010-2012, donde el comportamiento histórico es excelente en la parte alta de la cuenca. (tabla 16).

El WQI calculado para las tres campañas de monitoreo presenta una calidad excelente en todos los puntos monitoreados de la cuenca, debido a que cumple con todos los objetivos de calidad (tabla 17).

Iacal. Para calcular el indicador se utilizó información secundaria de acuerdo con los municipios de la cuenca, analizándolos desde la carga poblacional y de agricultura, debido a que en esta zona no se reportaron cultivos de café, sacrificio de ganado, industria y otras actividades económicas (tabla 18).

Seguidamente, se presentan los resultados del Iacal para los municipios de la cuenca del río Guatiquía (figura 6).

Tabla 17
Resultados del WQI en la cuenca del río Guatiquía, primer semestre de 2016

N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	WQI numérico	WQI cualitativo
1	Batea	II	2016	I	100,0	Excelente
2	Descarga río Frío	II	2016	I	100,0	Excelente
3	Captación San José	II	2016	I	100,0	Excelente
4	Descarga San Luis de Toledo	III	2016	I	100,0	Excelente

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

Tabla 18
Resumen de cargas contaminantes en la cuenca del río Guatiquía

Cargas contaminantes	DBO ₅ t/año	DQO t/año	DQO-DBO t/año	SST t/año	N _T t/año	P _T t/año	Total t/año
K _p	29,8	67,1	37,3	44,7	5,0	2,0	118,7
K _z	-	-	-	-	26,0	87,9	114,0
K	29,8	67,1	37,3	44,7	31,0	89,9	232,7
K final	29,8	67,1	37,3	44,7	31,0	89,9	232,7

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

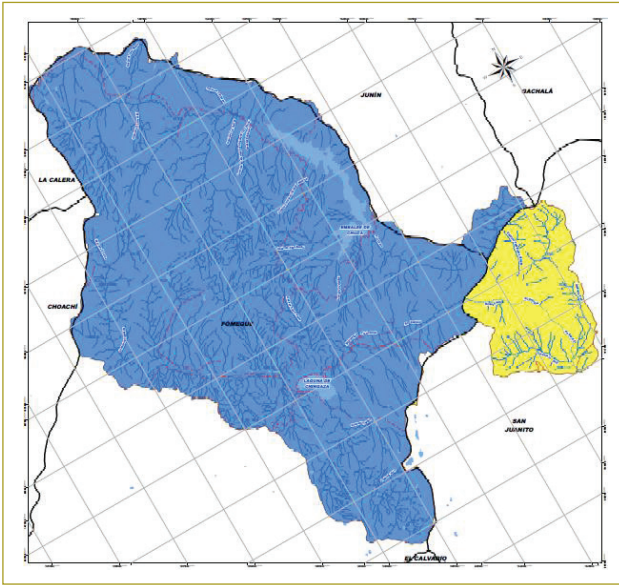


Figura 6. Municipios en la cuenca del río Guatiquía.
Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuencas, con base cartográfica del IGAC (2004).

Como se puede observar, el Iacal presenta valores bajos para los municipios de la cuenca del río Guatiquía en los parámetros de DBO_5 , DQO y SST, y valores entre bajos y muy altos en los parámetros de nitrógeno y fósforo generados por la agricultura.

CONCLUSIONES

Cuenca del río Blanco. Presenta una calidad del agua entre buena y regular. En la parte alta de la cuenca ésta se encuentra dentro de un área protegida, con influencia mínima de la población, la industria y la agricultura, por lo que la calidad es buena a lo largo del cauce principal del río Blanco.

Cuenca del río Une. En la parte alta tiene una calidad aceptable, correspondiente a la vereda Combura, y en los otros puntos, regular. El río Une recibe las descargas de Chipaque, Une y Cáqueza, lo cual explica este tipo de contaminación.

Cuenca del río Guatiquía. Esta cuenca se encuentra en unas condiciones de calidad buenas, gracias a que la influencia del hombre es mínima por encontrarse en el Parque Natural Nacional Chingaza, con excepción de la descarga de San Luis de Toledo, que se ubica en la vereda con el mismo nombre, donde no se evidenciaron vertimientos cercanos a la fuente que puedan contaminarla.

El agua de las cuencas de los ríos Blanco, Une y Guatiquía presenta un Iacal alto, por el alto contenido de nitrógeno y fósforo, producto de la agricultura.

Agradecimientos

Agradecimientos especiales a la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá, sobre todo al equipo de la Gerencia Ambiental, por el apoyo en la ejecución de la ERA para las cuencas de los ríos Blanco, Une y Guatiquía.

REFERENCIAS

- Alcaldía Municipal de Chipaque (2012). *Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Chipaque (EOT)*. Municipio de Chipaque.
- CPA Ingeniería (2014). *ERA, Fase II. Estudios básicos de las microcuencas ubicadas en municipios que conforman la región hídrica de interés de la EAB-ESP e implementación de la evaluación regional del agua (ERA)*. Bogotá.
- EAAB, Auditoría Ambiental Ltda. (2003). *Plan de Manejo Ambiental del sistema Chingaza*. Bogotá, D.C.
- EAB-ESP-Consorcio Hidrocuencas (2016). *Producto 4. Cálculo de los indicadores para la oferta, la demanda, la calidad y los riesgos asociados al recurso de las corrientes objeto de los estudios desarrollados 100 % de avance. Informe final*. Contrato de consultoría 1-02-24300-754-2015, cuyo objeto principal es "Elaborar los estudios de balance hídrico en cuencas que pertenecen a la región hídrica, mediante la implementación de los indicadores de la evaluación regional del agua (ERA), para diferentes escenarios hidrológicos, que permitan conocer el estado de las mismas, como estrategia de gestión integral del sistema hídrico frente a la variabilidad y el cambio climático".
- EAB-ESP -EPAM S.A. (2013). *ERA, Fase I. Realizar una propuesta de estrategias, metodologías y herramientas para la implementación de la evaluación regional del agua, así como para definir los requerimientos funcionales del sistema de información regional del recurso hídrico*. Bogotá, D.C.
- EAB-ESP-EPAM S.A. (2014). *Producto 3. Desarrollo y validación de evaluación regional del agua en la cuenca hidrográfica del río Tunjuelo*. Bogotá, D.C.
- Ideam (2010). *Estudio Nacional del Agua (ENA) 2010*. Bogotá.
- Ideam (2011). *Índice de calidad del agua en corrientes superficiales*. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/documents/24155/123679/08-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/c0c6eca3-1a2b-484c-82f8-76536f62e2c7.
- Ideam (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua*. Bogotá, D.C.
- Ideam (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, D.C.
- MADS (2007). Decreto 1323 de 2007, Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico SIRH. Bogotá, D.C.
- MADS (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Colombia.
- MADS (2011). *Ruta metodológica para la definición de los actores claves en la planeación de las áreas del sistema de Parques Nacionales Naturales*. Bogotá, D.C.

Estimación de la capacidad del Programa de Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Capacity estimate for the Industrial Engineering Program at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

SONIA ALEXANDRA JAIMES SUÁREZ¹ - CARLOS RODRIGO RUIZ CRUZ²- CAROLINA CASTRO³ - SEBASTIÁN GORDILLO³ - SEBASTIÁN MEZA³ - JUAN NIÑO³

1. Profesora asistente del Centro de Estudios en Optimización.

2. Profesor asistente del Centro de Estudios en Producción.

3. Estudiante. Miembro del Semillero en Gestión y Optimización de Operaciones.

sonia.jaimes@escuelaing.edu.co - carlos.ruiz@escuelaing.edu.co - carolina.castro@mail.escuelaing.edu.co
sebastian.gordillo@mail.escuelaing.edu.co - sebastian-meza@mail.escuelaing.edu.co - juan.nino@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 25/02/2017 Aceptado: 20/04/2017

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

Resumen

Mejorar la calidad de la educación es el objetivo más importante para cualquier institución educativa. Para lograrlo se requiere una adecuada gestión de los recursos necesarios para el desarrollo del quehacer académico. El propósito de este artículo es presentar una metodología para la estimación de la capacidad de un programa académico, en particular del Programa de Ingeniería Industrial (PII) de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Se desarrollaron dos fases. En la primera se define el concepto de capacidad de un programa académico y se desarrolla un modelo analítico que permite la evaluación de escenarios, en tanto que en la segunda se usa la dinámica de sistemas para la caracterización de la demanda y el flujo de estudiantes. De igual manera se evalúan los resultados del pronóstico de demanda generado en esta fase con el modelo analítico. Para el desarrollo y evaluación del modelo se utilizaron datos históricos entre los años 2008 y 2014. Los resultados muestran que con el plan de estudios actual y los recursos disponibles en el PII se tiene una capacidad instalada equivalente a 117 grupos de 30 estudiantes por periodo académico.

Palabras claves: capacidad, dinámica de sistemas, gestión académica.

Abstract

Improving the quality of education is the most important goal for any education institution. To achieve this, managing all necessary resources in an adequate manner is required. The objective of this paper is to show a methodology to estimate the capacity of an academic program, specifically the Industrial Engineering Program at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Two stages were developed. The first one defines the concept of capacity for an academic program and an analytical model is developed that allows to assess scenarios, while the second stage uses systems dynamics to characterize students demand and flow. Likewise, the results of the demand prognosis are assessed using the analytical model. To develop and evaluate the model, historical data from 2008 to 2014 were used. The results show that with the current curriculum and the available resources in the program, there is an installed capacity of 117 groups of 30 students for every academic term.

Keywords: capacity, systems dynamics, academic management.

INTRODUCCIÓN

La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito creó el Programa de Ingeniería Industrial (PII) en el año 1993, con modalidad presencial y una duración de diez semestres. Gracias a sus altos estándares de calidad educativa, el programa recibió la acreditación de alta calidad por primera vez en el año 2007, acreditación que se ha renovado en posteriores ocasiones. En cuanto a su población estudiantil, en los últimos años ha tenido en promedio 1300 alumnos. Las políticas de la institución no tienen definido un máximo de aspirantes que se puedan admitir en sus programas académicos. Sin embargo, es deseable saber de antemano la cantidad máxima de estudiantes que pueden ingresar al PII a través del tiempo debido al efecto sobre los recursos disponibles que genera el flujo de alumnos, buscando siempre mantener la máxima calidad educativa.

ANTECEDENTES

La capacidad se define como el potencial que tiene un sistema para llevar a cabo las funciones para las cuales se diseñó [1]. En el caso de los sistemas de servicios, su estimación representa un problema de difícil manejo debido a su naturaleza, diversidad y complejidad. Trabajos orientados a este objetivo se han desarrollado en servicios turísticos, como el caso del Parque Nacional Galápagos en Ecuador [2], para el cual se estableció la carga máxima, en número de visitantes admitidos en las diferentes áreas del parque. En ese estudio se consideró el impacto que tienen los visitantes sobre el entorno.

Serra [3] propone un marco integrado para el estudio de las dinámicas en sistemas turísticos. En el modelo desarrollado por este autor se considera que la capacidad se ve afectada por una interacción dinámica entre los elementos estructurales y los agentes participantes en las diversas dimensiones del sistema turístico.

En el caso particular de instituciones académicas la programación de cursos resulta otro elemento que hay que considerar en la definición de la capacidad como sistema. Al respecto, Daskalaki et al. [4] proponen un modelo de programación entera para la programación de asignaturas, con el fin de minimizar los costos; Betinelli et al. [5] proponen factores adicionales que influyen en el problema, que se ha denominado *Curriculum-Based Course Timetabling Problem*.

METODOLOGÍA

Inicialmente, se recopilieron datos que permitieron caracterizar la naturaleza del sistema. Los datos utilizados se obtuvieron principalmente de la base de datos de la Oficina de Registro y Control Académico de la Escuela y corresponden a los periodos académicos regulares entre los años 2008 y 2014. Esto garantiza la inclusión de observaciones de por lo menos una cohorte completa del PII, dado que la duración nominal del programa es de cinco años. Otras fuentes de información fueron el archivo histórico de la Decanatura de Ingeniería Industrial y de los departamentos de Ciencias Básicas y Humanidades. La información recopilada permitió caracterizar, entre otros, los siguientes parámetros:

- Cantidad de asignaturas en el plan de estudios del PII.
- Requisitos entre las asignaturas necesarias para cursar el plan de estudios.
- Número promedio de alumnos por periodo que cursa cada una de las asignaturas del plan de estudios.
- Número promedio de grupos necesarios por periodo de cada asignatura.
- Porcentaje de estudiantes que aprueban, reprobaban o cancelan cada asignatura por periodo.
- Número promedio de salones asignados al PII por periodo académico.
- Cantidad de franjas de tiempo horarias disponibles por semana.
- Número de profesores de planta y cátedra disponibles para orientar cada asignatura.
- Lineamientos para la dedicación a docencia de profesores de planta y cátedra.

Esta información fue base para modelar el sistema y poder determinar su capacidad. En general, la capacidad de un programa académico depende de tres recursos claves: cantidad de salones por franja horaria, disponibilidad de profesores por franja horaria y la cantidad de franjas horarias disponibles. Dado el elevado número de factores que interactúan en el sistema y su consecuente complejidad, se utilizó una metodología de análisis y solución de dos fases:

- Definición analítica de la capacidad.
- Caracterización de demanda y flujo de estudiantes.

Fase 1. Definición analítica de la capacidad

La capacidad de un sistema está definida por el recurso que más lo limita, es decir, cada recurso utilizado tiene una capacidad máxima, pero aquel que tenga la menor capacidad determina la capacidad máxima de todo el sistema. Este recurso también se conoce como cuello de botella. En general, los recursos necesarios para la operación del PII se pueden clasificar en dos categorías:

- *Recursos estructurales.* Son los recursos físicos necesarios para el desarrollo de las actividades académicas. En el modelo, corresponden a los salones necesarios para el desarrollo de las sesiones de clase.
- *Recursos humanos.* Son las personas que desarrollan las actividades académicas propias del programa. En el modelo, corresponden a los profesores de planta y cátedra.

Los supuestos y parámetros para la definición de indicadores, así como el posterior cálculo de la capacidad, son:

- Sólo se tienen en cuenta las asignaturas propias del Programa de Ingeniería Industrial. Es decir, se excluyen las asignaturas de formación en ciencias básicas y humanidades, entre otras, ya que éstas son administradas por otras dependencias académicas de la institución.
- Una franja horaria (FH) tiene una duración de 1,5 horas.
- Hay 43 franjas horarias disponibles por semana.
- La institución ha asignado para la programación de asignaturas propias del PII seis salones (S) por franja horaria.
- El programa cuenta con un equipo de 17 profesores de planta y 37 profesores de cátedra.
- Debido al perfil de formación y el campo de estudio, se definieron ocho perfiles (i) de profesores de planta (PPi), que determinan las asignaturas del plan de estudios que podrían orientar. Igualmente, los profesores de cátedra (PCi) pueden pertenecer a unos de estos perfiles, aunque en general tienen mayor flexibilidad que los profesores de planta.
- Considerando la duración de las franjas horarias, los lineamientos institucionales y la carga promedio en docencia de un profesor de planta, éste puede ofrecer un máximo de seis franjas de clase a la semana (FPP)

y uno de cátedra, máximo diez franjas de clase por semana (FPC).

- El promedio de franjas horarias de las asignaturas del programa (PFA). Indica la intensidad semanal, en términos de franjas horarias, de todas las asignaturas del PII. De acuerdo con el plan de estudios vigente, el PFA del programa es de 2,2 franjas horarias por grupo de la asignatura por semana.

A partir de lo anterior se definen dos indicadores:

- Capacidad estructural (CE), que establece la capacidad máxima de los recursos estructurales. Se define por la siguiente expresión:

$$CE = \frac{S \times FH}{PFA}$$

Para el caso particular del PII, la capacidad estructural sería:

$$CE = \frac{6 \times 43}{2,2} \sim 117 \text{ grupos}$$

- Capacidad del recurso humano (CRH), que establece la capacidad máxima que se puede obtener, dada la cantidad de profesores disponibles. Ésta se define como:

$$CRH = \sum_{i=1}^n CRHi$$

Donde CRHi corresponde a la capacidad máxima en grupos de clase que se tiene para cada uno de los perfiles de profesores (i) identificados. Ésta debe calcularse para cada uno de los perfiles determinados previamente. Se define con la siguiente expresión:

$$CRHi = \frac{(PPi \times FPP) + (PCi \times FPC)}{PFAi}$$

Donde PFAi indica la intensidad semanal, en términos de franjas horarias, de las asignaturas que pueden orientar los profesores del perfil i. A manera de ejemplo se presenta el cálculo de la capacidad de los profesores del perfil 1. Este perfil corresponde a profesores cuyo campo de estudio es la investigación

de operaciones. Según este perfil, los profesores podrían orientar las asignaturas Modelos Matemáticos (MMAT), Optimización de Operaciones (OPDO) y Modelos Estocásticos (MOES). La capacidad de los profesores de este perfil sería:

$$CHRI = \frac{(3 \times 6) + (2 \times 10)}{2} = 19 \text{ grupos}$$

Para el caso del PII se calcularon las capacidades de cada uno de los ocho perfiles identificados y se obtuvo una CRH de 119.

Finalmente, la capacidad máxima del programa (CP) se puede establecer como el mínimo entre la capacidad estructural y la capacidad del recurso humano:

$$CP = \min (CE, CRH)$$

En el caso del PII se encontró analíticamente que su capacidad máxima era de 117 grupos y está definida por la capacidad estructural.

En la siguiente fase se define con exactitud la cantidad de grupos que se deben atender por asignatura, teniendo en cuenta el efecto de los estudiantes admitidos a primer semestre y el comportamiento de esta demanda a lo largo del tiempo, considerando elementos como las tasas de deserción, maternidad y prerrequisitos del plan de estudios, entre otros.

Fase 2. Caracterización de la demanda y flujo de estudiantes

Con el fin de incorporar más elementos que afectan el comportamiento de la capacidad en el PII se utilizó como herramienta la dinámica de sistemas (DS). La DS es una metodología para el análisis y simulación de sistemas complejos [6]. Siguiendo la estructura metodológica de la DS, se desarrollaron estas etapas:

- *Identificación del problema y análisis del comportamiento.* Se determinaron las variables claves, los límites del modelo y los comportamientos que lo caracterizan. En el desarrollo del modelo se tuvieron en cuenta los siguientes supuestos y parámetros:

- El plan de estudios está compuesto de 63 asignaturas, de las cuales 27 asignaturas teóricas y 4 asignaturas de laboratorio son administradas académicamente por la Decanatura de Ingeniería Industrial. Las restantes 36, por otros departamentos o decanaturas.
- Existen requisitos para cursar una asignatura. Éstos se definen como las asignaturas que se deben cursar y aprobar previamente. De igual manera, existen correquisitos definidos como asignaturas que se deben cursar simultáneamente.
- La tasa de maternidad de una asignatura se define como el porcentaje de alumnos que aprueban una asignatura.
- La tasa de deserción se define como el porcentaje de alumnos que abandonan la institución, por motivos académicos o personales.
- La tasa de cancelación se define como el porcentaje de alumnos que inscriben una asignatura, pero que por decisión propia deciden retirarla en algún momento del periodo académico.
- Número de aspirantes admitidos para cursar primer semestre.
- La asignatura Producción más Limpia (PMLI) se consideró como requisito para cursar asignaturas de profundización. Esta asignatura garantiza que un estudiante ha cursado por lo menos el 70 % de los créditos académicos del total del plan de estudios.

- *Modelamiento cualitativo del sistema.* Teniendo en cuenta los supuestos y parámetros definidos anteriormente, se definieron de manera causal las influencias entre los elementos del sistema. Estas influencias se representaron a través del diagrama causal.
- *Modelamiento cuantitativo del sistema.* Se desarrolló el diagrama de Forrester, que permite establecer las ecuaciones matemáticas que definen el comportamiento del sistema a partir del diagrama causal. Se utilizó el *software* Ithink® para representar gráficamente el modelo, conceptualizar, documentar, simular y analizar las interacciones de los elementos del sistema. En el diagrama de Forrester se consideran los siguientes elementos (figura 1):

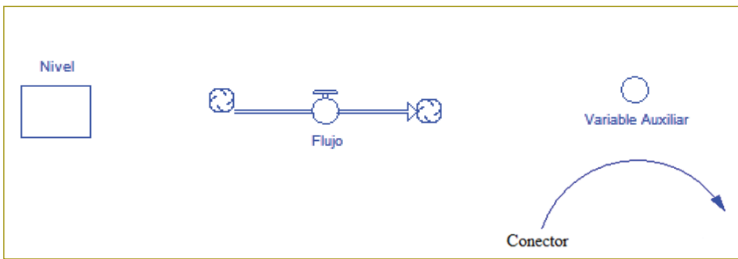


Figura 1. Elementos de un diagrama de Forrester.

- *Niveles*. Variables que acumulan o consumen recursos. En el modelo desarrollado, cada asignatura tiene un nivel y representa el número de estudiantes que la están cursando.
- *Flujos*. Variables que representan la tasa de cambio de un nivel. En el modelo representan el flujo de estudiantes que pueden cursar una asignatura y aprobarla, reprobarla o cancelarla.
- *Convertidores o variables auxiliares*. Variables o constantes que toman datos de entrada y los convierten en una señal de salida. En el modelo representan las tasas de maternidad, cancelación y deserción.
- *Conectores*. Indican las relaciones causales entre elementos del modelo. En el modelo representan las relaciones entre el flujo de entrada a una asignatura, el nivel de las asignaturas, el impacto de la maternidad y la deserción en el flujo de salida, y cómo se convierte el flujo de salida de

estudiantes aprobados en el flujo de entrada para otras asignaturas, y los estudiantes reprobados en una retroalimentación del nivel de una asignatura.

Como ejemplo, se presenta en la figura siguiente la dinámica de la asignatura Producción más Limpia (PMLI), representada a través de un diagrama de Forrester (figura 2).

En esta figura se representa el número de estudiantes en la asignatura en un periodo de tiempo (nivel PMLI). Como flujo de entrada se definió *Entrada PMLI*, que representa el flujo de estudiantes que pueden cursar la asignatura. Este flujo se ve influenciado por variables auxiliares que lo aumentan: *Salida A CMAN* y *Salida A BIOL*, que representan, respectivamente, el flujo de estudiantes que aprobaron las asignaturas Costos de Manufactura (CMAN) y Biología (BIOL), que son los dos requisitos para cursar PMLI, según el plan de estudios. Igualmente, el flujo puede aumentar debido a los estudiantes que reprueban o cancelan la asignatura (*Salida B PMLI*), que se convierten en una realimentación del nivel. Esta realimentación está influenciada por las tasas de reprobación (*Mat'PMLI*) y cancelación (*C PMLI*). La tasa de reprobación es el complemento de la tasa de maternidad (*Mat PMLI*), que establece la proporción histórica de estudiantes que aprueban una asignatura. Por otra parte, el flujo se ve influenciado por variables auxiliares que disminuyen el flujo, que representan las

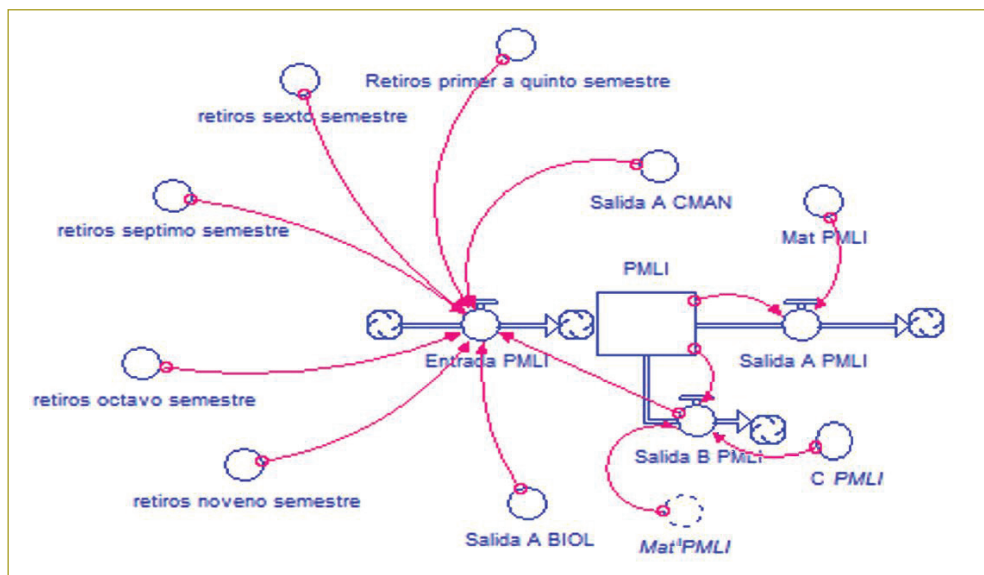


Figura 2. Diagrama de Forrester de la asignatura PMLI.

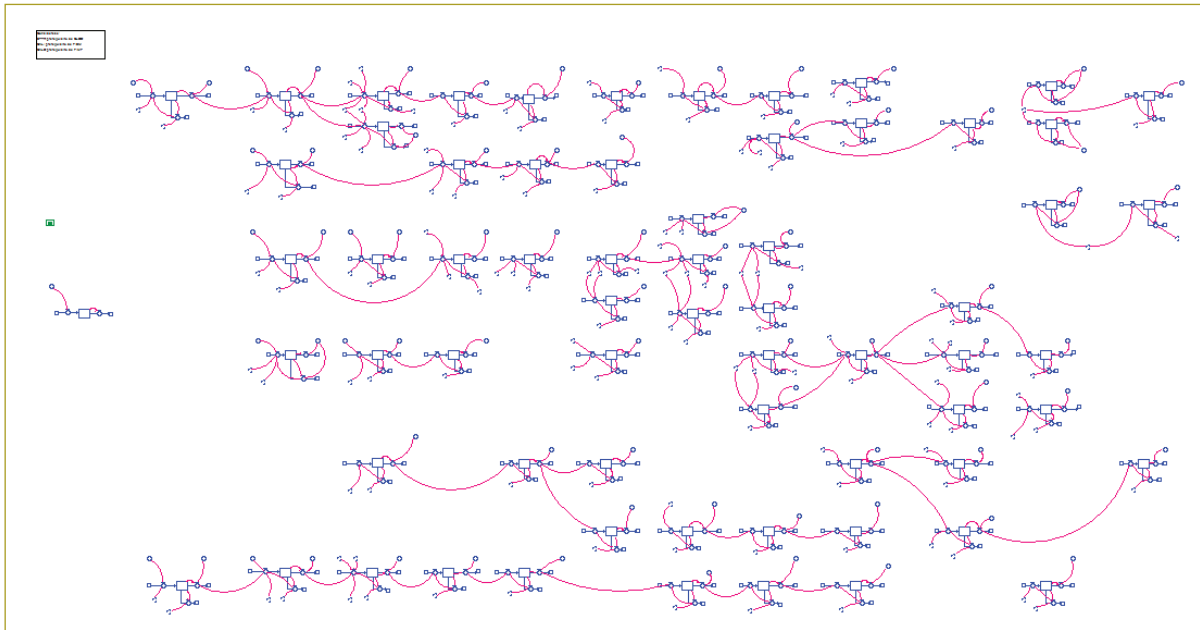


Figura 3. Diagrama de Forrester del plan de estudios del Programa de Ingeniería Industrial.

tasas de deserción: *retiros primer semestre a quinto semestre, retiros sexto semestre, retiros séptimo semestre, retiros octavo semestre y retiros noveno semestre*. Éstas se definieron a partir de la matriz de probabilidades de deserción del PII [7]. El flujo de salida de la asignatura puede ser de dos tipos: quienes aprueban la asignatura (*Salida A-PMLD*), que como se mencionó previamente, depende de la tasa de maternidad, y quienes la reprueban o cancelan la asignatura (*Salida B-PMLD*). Matemáticamente, el modelo establece las ecuaciones que garantizan el balance entre sus variables.

Para el estudio se desarrolló el diagrama de Forrester de las asignaturas del plan de estudios que administra académicamente el PII (figura 3):

Para la validación del modelo se simularon 200 periodos académicos y se contrastaron los resultados con los registros históricos de estudiantes inscritos en las asignaturas, encontrando una alta correlación en los resultados. A continuación se presenta la comparación entre los datos históricos y la simulación para la asignatura Calidad (histórico CLDD, simulación CLDD*). En este caso se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,92 (figura 4).

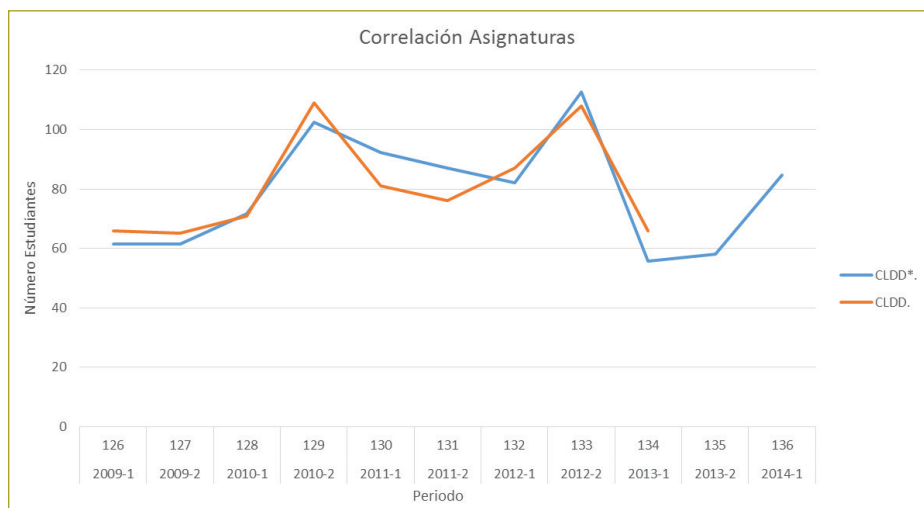


Figura 4. Comportamiento histórico y simulado del número de estudiantes en la asignatura Calidad.

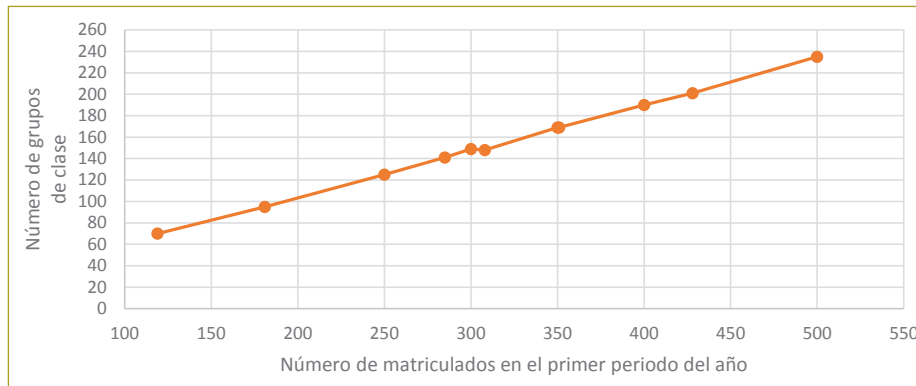


Figura 5. Número de grupos de clase necesarios, de acuerdo con el número de estudiantes.

Para obtener conclusiones más detalladas, que permitieran una mejor toma de decisiones estratégicas, se hizo análisis de sensibilidad. Para éste se definieron 12 escenarios con valores aleatorios entre 100 y 500 estudiantes matriculados a primer semestre en el PII. En la práctica, las matrículas no tienen un comportamiento estacionario, es decir, el número de estudiantes que se matriculan en el primer periodo del año es diferente del que se matriculan en el segundo. Como parámetro para considerar esta estacionalidad, se definió que los matriculados en el segundo periodo del año representan un 30 % menos que los matriculados en el primer periodo del año.

RESULTADOS

Una vez desarrolladas las simulaciones para los escenarios propuestos, se analizaron sus resultados frente a los recursos necesarios para cada uno de ellos. En la figura anterior (figura 5) se presenta el número de grupos de clase necesarios en promedio por periodo, de acuerdo con el número de estudiantes matriculados. Al comparar con los resultados analíticos, que para la situación actual permitió establecer que la capacidad del PII es de 117 grupos, el número máximo de estudiantes que se pueden admitir es de aproximadamente 230 estudiantes matriculados en el primer periodo del año y 160 en el segundo periodo. En la práctica, este número es cercano al número real de matriculados en el programa, por lo que se puede concluir que en la actualidad el PII está operando con un número de estudiantes muy cercano a lo que le permite su capacidad máxima.

Considerando la capacidad estructural, en la figura siguiente se muestra el número de salones necesarios para

atender la demanda (figura 6). Se observa que el número de salones disponible en la actualidad es suficiente hasta cuando el número de matriculados en el primer periodo del año supere los 300 estudiantes, aproximadamente. Al respecto de este recurso, es importante anotar que el número de salones calculado supone que éstos se usan a su máxima capacidad, es decir, que todas las franjas horarias se utilizan todos los días, lo que en la realidad puede que no se logre debido a factores como la disponibilidad horaria de los profesores de planta y cátedra, y las políticas de programación de los cursos, en las que se puede establecer, por ejemplo, que entre dos sesiones sucesivas de un curso debe haber por lo menos un día de separación, y que se deben programar en el mismo horario, entre otras. Estas restricciones prácticas no se consideraron en el modelo, ya que son parte de la programación operativa detallada del PII y el modelo tiene el propósito de soportar las decisiones de carácter estratégico. Por lo tanto, este número de salones

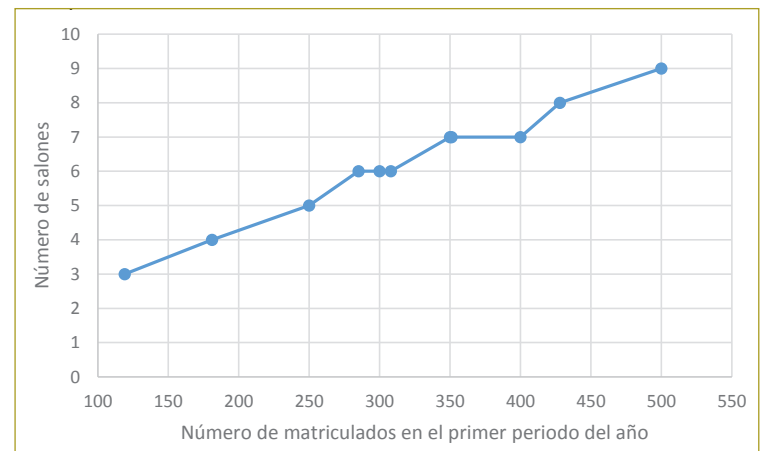


Figura 6. Número de salones necesarios, de acuerdo con el número de estudiantes matriculados.

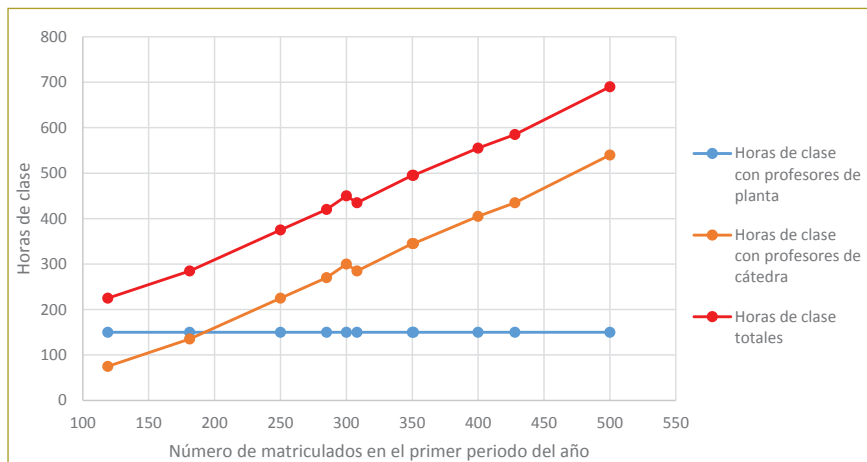


Figura 7. Número de horas de clase necesarias, de acuerdo con el número de estudiantes matriculados.

es una aproximación optimista, que en la realidad puede requerir un número de salones ligeramente superior.

Considerando la capacidad del recurso humano, se muestra el número de horas de clase necesarias para atender la demanda (figura 7). Se observa que para un escenario equivalente a la operación actual, unos 230 estudiantes matriculados en el primer periodo del año, aproximadamente el 40 % de las horas de clase necesarias se cubre con profesores de planta y el 60 % restante con profesores de cátedra, lo cual es coherente con lo que sucede en la realidad. A partir de estos resultados también se podrían establecer políticas acerca de la relación de horas de clase orientadas por profesores de planta y cátedra, ya que si con la capacidad actual de 15 profesores de planta se matricularan en el primer semestre del año 500 estudiantes y en el segundo 350, la proporción de horas de clase orientadas por profesores de planta y cátedra sería aproximadamente 20 y 80 %, en ese orden.

CONCLUSIONES

- Se pudo establecer que la capacidad del programa con los recursos disponibles actualmente es de 117 grupos de 30 estudiantes y a través del modelo de dinámica de sistemas se identificó que en las condiciones actuales el PII está cerca de su capacidad máxima.
- Se identificó que el recurso que más limita la capacidad del programa es la cantidad de salones disponibles por franja horaria. El número de profesores de planta y cátedra actuales es suficiente, considerando su disponibilidad, y con una proporción importante

de planta cubriendo las asignaturas propias del PII. Este mismo recurso resulta ser el más flexible para aumentar la capacidad del programa a corto plazo.

- Se pudo desarrollar un modelo de análisis de los factores que pueden afectar la capacidad del programa y de esta misma forma incorporar los posibles efectos en la toma de decisiones en el futuro y la necesidad y uso de recursos en diferentes escenarios.
- La metodología propuesta puede ser la base para el análisis de la capacidad de todos los programas académicos de la institución y a su vez de la capacidad de ésta, lo que puede servir como base para la definición de estrategias de ampliación a mediano y largo plazo.

REFERENCIAS

- [1] Blackstone, J.H. (2013). *Apics Dictionary*. Chicago, IL.: APICS.
- [2] Cayot, L. Silvestre, and Instituto Ecuatoriano Forestal y de Areas Naturales y Vida Silvestre (1996). *Determinación de la capacidad de carga turística en los sitios de visita del Parque Nacional Galápagos*. Puerto Ayora (Ecuador): Servicio Parque Nacional Galápagos, Instituto Ecuatoriano Forestal y de Áreas Naturales y Vida Silvestre.
- [3] Serra, F.M.D. (2012). Modistur. Un modelo dinámico para administración estratégica de destinos turísticos. *Fisec-Estrategias*, 7, 155-189.
- [4] Daskalaki, S., Birbas, T. & Housos, E. (2014). An integer programming formulation for a case study in university timetabling. *European Journal of Operational Research*, 153 (1), 117-135.
- [5] Bettinelli, A., Cacchiani, V., Roberti, R. & Toth, P. (2015). An overview of curriculum-based course timetabling. *TOP* 23 (2), 313-349.
- [6] Forrester, J.W. (1961). *Industrial Dynamics*. Massachusetts: The MIT Press.
- [7] Rodríguez, C.Y. (2015). Proyecto de análisis de la retención estudiantil en el Programa de Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá.

Presentación del *Manual de mantenimiento de carreteras* del Instituto Nacional de Vías

Launch of the Highway Maintenance Manual from the National Highway Institute

FERNANDO SÁNCHEZ SABOGAL

Ingeniero civil.

elexdos@gmail.com

Recibido: 19/04/2017 Aceptado: 30/04/2017

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

Resumen

El *Manual de mantenimiento de carreteras* se presentó formalmente ante la comunidad de la ingeniería nacional el día 5 de abril de 2017 en el auditorio A-301 de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. La presentación corrió a cargo del ingeniero Fernando Sánchez Sabogal, quien dirigió el proyecto elaborado por el Consorcio Manual Vial para el Instituto Nacional de Vías. El artículo ofrece un extracto de las palabras dirigidas al auditorio por el ingeniero Sánchez durante el acto de lanzamiento del manual.

Palabras claves: mantenimiento vial, usuarios, costos de operación, sobrecargas, especificaciones de mantenimiento.

Abstract

The Highway Maintenance Manual was formally presented to the national engineering community on April 5th, 2017, in auditorium A301 at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. The presentation was led by engineer Fernando Sanchez Sabogal, who directed the project developed by the Manual Vial Consortium for the National Highway Institute. This document offers an excerpt of the presentation given by Engineer Sanchez during the launch.

Keywords: road maintenance, users, operating costs, overloads, maintenance specifications.

IMPORTANCIA DEL MANTENIMIENTO DE LAS CARRETERAS

En términos amplios, el mantenimiento vial se puede definir como el conjunto de actividades que se realizan para conservar en buen estado las condiciones físicas de los elementos que constituyen los caminos y, de esta manera, garantizar que el transporte sea cómodo, seguro y económico. Su correcta ejecución implica el establecimiento de niveles adecuados de intervención, dentro del periodo de duración de cada elemento, con el fin de limitar los efectos del deterioro producido por los procesos naturales y el uso, contribuyendo así a prolongar la vida útil de la obra.

El propósito del mantenimiento es, entonces, conservar la red vial dentro de un nivel compatible con el servicio que deba prestar. Conservar adecuadamente las carreteras tiene tres propósitos principales, ligados con el buen funcionamiento de la economía nacional y con la generación de toda una gama de beneficios económicos y sociales: 1) prolongar su vida y diferir la fecha en que se deben renovar; 2) proporcionar comodidad y seguridad, y disminuir los costos de operación vehicular, y 3) garantizar la transitabilidad en forma permanente, con el propósito de permitir mayor regularidad, puntualidad y seguridad en los servicios de transporte por carretera. El primer propósito está relacionado directamente con los intereses de la organización administradora de las carreteras, el segundo lo está con los intereses de los

operadores de los vehículos y el tercero con la ciudadanía en general.

Los resultados de estudios realizados en muchas partes del mundo han demostrado que los beneficios más importantes de la conservación de carreteras no son los que perciben las autoridades de vialidad, sino los que se obtienen en forma de ahorros en el costo de operación vehicular y en el mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad, y que el mantenimiento ofrece el mejor retorno de toda la inversión que se hace en el sector transporte. A menudo, por no decir que casi siempre, son los ahorros en los costos de operación vehicular derivados del buen estado de las carreteras los que permiten llegar a decisiones económicamente óptimas en materia de política de mantenimiento vial. Este hecho es fundamental, por cuanto es muy frecuente que la asignación de recursos para atender el mantenimiento se justifique en las agencias viales solamente a partir de un cierto número de consideraciones internas, sin tener en cuenta que los efectos sobre los usuarios y sobre la sociedad en general son mucho más importantes.

La Asociación Mundial de la Carretera¹, adaptando información contenida en un documento del Comité para el Desarrollo Internacional, considera que la conservación de carreteras tiene los efectos que se muestran en la tabla siguiente sobre los objetivos del milenio en los países en desarrollo (tabla 1).

Tabla 1
Influencia del mantenimiento vial en los objetivos de desarrollo del milenio

Objetivo	Aporte del mantenimiento vial
Erradicar la pobreza extrema	Es necesario un transporte regional eficaz para el comercio Las carreteras son necesarias para el crecimiento de la economía rural
Lograr la enseñanza primaria universal	La facilidad de acceso que proporcionan las carreteras vecinales influye sobre la escolarización y la asistencia a la escuela
Promover la igualdad de género en la educación	La asistencia de las niñas a la escuela aumenta considerablemente si las carreteras son más seguras
Reducir la mortalidad infantil	El acceso adecuado a los servicios de salud se refuerza con carreteras en buen estado
Mejorar la salud materna	
Combatir el VIH, el paludismo y otras enfermedades	
Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente	El mantenimiento oportuno de las vías ahorra costos a largo plazo y reduce el consumo de recursos no renovables
Fomentar una alianza mundial para el desarrollo	Se requieren inversiones para compartir conocimientos sobre las mejores prácticas de conservación vial

1. Asociación Mundial de la Carretera (2014). *Importancia de la conservación de carreteras*, 2014R02ES.

Los análisis empíricos han demostrado que una carretera pavimentada en condiciones razonablemente satisfactorias produce ahorros suficientes en el desgaste y en el costo de mantenimiento de los vehículos como para reducir sus costos de operación en un 15 % (los cálculos recientes del Invías indican valores inferiores al 10 % para los vehículos livianos) de lo que serían si el mantenimiento fuese deficiente. A precios de 2015, un ahorro del 15 % significa unos \$115 por kilómetro para los vehículos livianos, \$465 para los buses y del orden de \$780 para los vehículos pesados, aún sin contar el beneficio en el ahorro del tiempo de los pasajeros; es decir, un total de \$31,9 millones al año por kilómetro en el caso de una carretera típica colombiana donde circulen 250 vehículos por día y hasta de \$127 millones/km donde la circulación diaria llegue a los 1000 vehículos. En el caso de las carreteras destapadas, los estudios internacionales indican que el ahorro unitario puede representar hasta el 30 % o más, aunque, normalmente, el tránsito será mucho menor. Los valores reportados por el Invías en 2015 para estas carreteras muestran reducciones cercanas al 15 % en los costos de operación de los vehículos livianos y hasta del 20 % para los buses y camiones.

El mantenimiento de una carretera comprende múltiples operaciones de ingeniería de pequeña escala que se repiten a intervalos variables, dependiendo del clima, la topografía, el tránsito y las normas de diseño de la vía. Estas operaciones se suelen clasificar de acuerdo con la frecuencia con que se repiten. En primer lugar, está el “*mantenimiento rutinario*” que consiste en operaciones que normalmente se deben realizar una o más veces al año, como el control de la vegetación en el derecho de vía, la limpieza de obras de drenaje, el emparejamiento de superficies no pavimentadas, el relleno de baches y la reparación de grietas. En segundo lugar, está el “*mantenimiento periódico*”, que abarca operaciones que se deben ejecutar a plazos más amplios, como los resellos de las calzadas pavimentadas y las recargas de grava de las destapadas. Un tercer grupo, tanto o más importante que los anteriores, por cuanto la reacción ante su ocurrencia debe ser inmediata, lo constituye la “*atención de emergencias*”, que son aquellas situaciones impredecibles o poco frecuentes, cuya magnitud y efectos impiden o restringen fuertemente el tránsito; situaciones producidas, generalmente, por fenómenos naturales de especial intensidad, como lluvias excesivas,

crecientes extraordinarias de cursos de agua, sismos, marejadas o erupciones volcánicas; aunque su origen también puede ser antropogénico, tales los casos de los incendios forestales, la deforestación de taludes, el uso inapropiado del agua, el mal manejo de desechos y de aguas residuales, el terrorismo, etc.

El costo anual del mantenimiento de rutina, en el supuesto de operaciones razonablemente eficientes realizadas por microempresas, oscila hoy en día entre \$7 y \$14 millones por kilómetro. En cuanto al mantenimiento periódico, un informe reciente del Instituto Nacional de Vías² cifra los gastos entre \$1000 y \$1800 millones/km en carreteras pavimentadas en los años en que son necesarios, mientras que con respecto a las vías no pavimentadas, los gastos anuales aconsejables sobre las mismas bases se estiman entre \$600 y \$800 millones/km. Estos rangos son amplios debido a que los gastos dependen, en gran medida, del tipo de terreno, de la agresividad del clima, de la edad de las calzadas intervenidas y de la intensidad del tránsito.

Las cifras recién mencionadas significan que, en promedio, los gastos anuales en mantenimiento rutinario y periódico no deberían superar el 1 o 2 % de la inversión original actualizada en carreteras pavimentadas y del 3 a 5 % en las no pavimentadas. Aunque estos gastos son muy bajos en relación con el capital invertido en las carreteras y con los beneficios que rinden, se deben hacer de manera muy regular y en el momento oportuno para aprovechar todo su valor potencial. Esto es así, debido a la importancia del ahorro anual en los costos de operación y a las inversiones que se hace necesario realizar antes de lo previsto en rehabilitación, cuando no en reconstrucción, siempre que se descuidan las tareas de mantenimiento.

Por lo tanto, contrariamente a lo que se suele sostener en círculos ajenos a la ingeniería, en especial los relacionados con los medios de comunicación, hay pocas tareas de mantenimiento que se puedan reducir o aplazar sin ocasionar costos mayores en la conservación, la rehabilitación o la reconstrucción futuras y, sobre todo, en los de operación vehicular.

Un factor decididamente grave en relación con el deterioro prematuro de las carreteras es el de las sobrecargas vehiculares. Cualquiera que sea la distribución de

2. Instituto Nacional de Vías, Acta N.º OAP-0001, 29-11-2016.

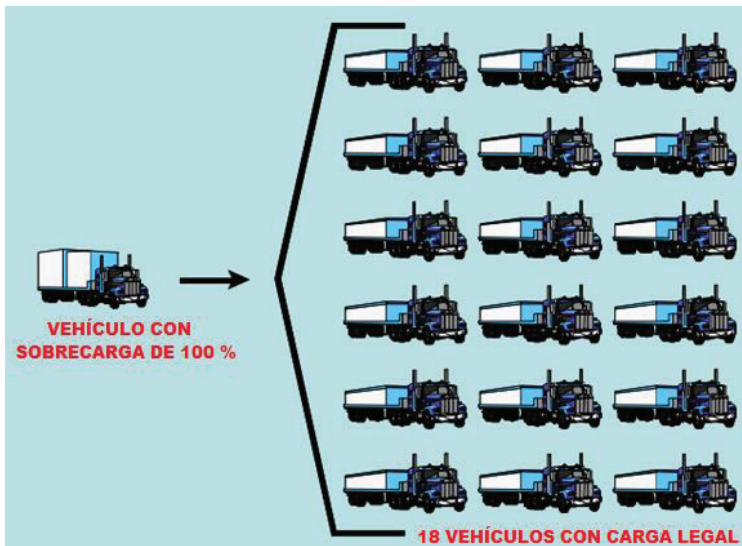


Figura 1. Efectos del deterioro producido por las sobrecargas vehiculares sobre las carreteras³.

los ejes, el peso concentrado en un camión causa mucho más daño que si estuviera repartido en dos camiones y tiene efectos semejantes a un aumento de tránsito mucho mayor que el proporcionalmente equivalente (figura 1). Conocida es de los ingenieros de pavimentos la sencilla regla de la cuarta potencia, según la cual el paso de una carga por eje 50 % mayor que la de diseño equivale a 5 pasadas de esta última, en tanto que si es 100 % mayor la equivalencia sería de 16. Los estudios sobre el tránsito vehicular indican que en los países en desarrollo es muy difundida la práctica de la sobrecarga y tanto mayor cuanto mayor es el subdesarrollo. Y, a pesar de que los métodos corrientes de diseño de pavimentos intentan considerar esta circunstancia en vista de las dificultades prácticas que se experimentan para hacer cumplir las resoluciones y decretos sobre límites de carga, la realidad supera, muchas veces, los escenarios más pesimistas.

La experiencia nacional e internacional indica, como ya se mencionó, que las tasas de rentabilidad resultantes de los proyectos de mantenimiento suelen ser elevadas, mayores muchas veces que las de los proyectos de nueva construcción y siempre superiores a los costos de oportunidad del capital, a pesar de las deficiencias

considerables en cuanto al logro de los objetivos materiales. Sin embargo, se debe reconocer que pese a sus evidentes beneficios económicos y sociales, el mantenimiento vial ha recibido consuetudinariamente un limitado apoyo presupuestal, hecho que en buena parte obedece a que, como apareció publicado en algún diario español⁴, “conservar carreteras no tiene *glamour*, no requiere de actos oficiales, de discursos y cortes de cinta. Y el ciudadano no percibe la inversión realizada”.

A manera de resumen de esta primera parte de la presentación, se muestran algunos detalles elementales sobre tres importantes conclusiones que sirven para subrayar la necesidad de hacer un mantenimiento efectivo a las carreteras (tabla 2), en tanto que en la figura que se incluye a continuación se pretende ilustrar la manera como el ciclo nocivo de un mantenimiento inadecuado se traduce en un mal servicio y en aumentos en los costos de los usuarios, a la vez que en pérdidas en el patrimonio de la agencia vial por una baja recuperación de su inversión (figura 2).

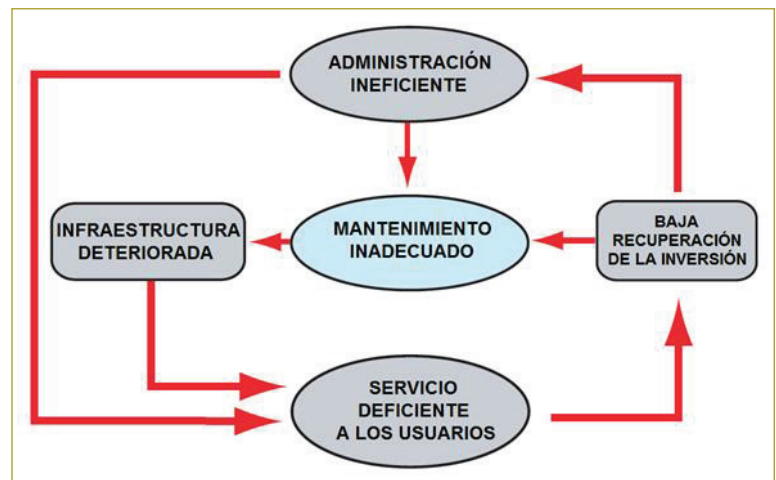


Figura 2. Ciclo de un mantenimiento vial inadecuado⁵.

3. Department of Transport, Republic of South Africa (April 2007). “The damaging effects of overloading vehicles on roads”. Pretoria.

4. *El País*. Carreteras sin cuidar o reparar. Madrid, España, 27 de abril de 2013.

5. Ministry of Transport and Communication (May 2010). Botswana Roads Maintenance Manual (BRMM). Part A. Gaborone.

Tabla 2
Necesidad del mantenimiento vial

NECESIDAD DEL MANTENIMIENTO DE LAS CARRETERAS		
Seguridad vial	Inversión de larga vida	Costos de los usuarios
Problema	Problema	Problema
<p>Hay muchos elementos de la carretera que pueden generar riesgos a los usuarios:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Crecimiento de vegetación que reduzca la visibilidad – Baches en la superficie – Inundaciones por colmatación de alcantarillas – Pérdida de legibilidad de señales y marcas viales – Daños en puentes y barandas – Superficies resbalosas – Deslizamientos – Erosión de bermas 	<p>La mayoría de las estrategias de diseño y análisis de factibilidad asumen que se atenderán oportunamente las imperfecciones localizadas que se produzcan y que los pavimentos requieren refuerzos cuando el uso lo exige para prolongar su vida útil.</p> <p>Si se permite, por ejemplo, la presencia de grietas sin sellar, el agua ingresará a la estructura, generando deterioros prematuros en el pavimento y debilitando el soporte.</p>	<p>Existe una clara relación entre la condición superficial (IRI) y los costos de operación vehicular. Esta relación es incorporada como parte esencial del modelo HDM.</p> <p>Si la tasa de deterioro no es controlada, la rugosidad se incrementa a una velocidad acelerada.</p>
Efecto	Efecto	Efecto
Mayor accidentalidad vial	Costos adicionales a la agencia vial	Costos adicionales a los usuarios
<p>Aparte del costo relacionado con vidas humanas, los accidentes de tránsito generan:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Necesidad de servicios hospitalarios adicionales – Aumentos en las primas de seguro de vehículos – Pérdida de tiempo de trabajo entre los lesionados – Costos de reparación de los vehículos 	<p>La falta de un control oportuno de los defectos se traduce en la necesidad de anticipar los refuerzos, cuando no de rehabilitar o reconstruir el pavimento.</p> <p>Esto significa ineficiencia de la administración y un uso ineficiente de los escasos recursos públicos destinados al mantenimiento vial.</p>	<p>Un incremento de la rugosidad se traduce, inevitablemente, en un incremento en los costos de operación vehicular y, por lo tanto, en los costos de los usuarios, que representan el mayor componente de los costos de transporte y aumentan con el incremento en los volúmenes de tránsito.</p>
SOLUCIÓN		
MANTENIMIENTO VIAL EFECTIVO Y OPORTUNO		
<p>La agencia de vialidad debe asegurar que se establezcan y mantengan adecuados estándares de seguridad. Se deben hacer inspecciones rutinarias para adoptar medidas en momentos oportunos.</p> <p>El registro y el análisis de los datos sobre accidentes dan indicios sobre las deficiencias de mantenimiento.</p>	<p>El mantenimiento eficiente apunta a detener la velocidad del deterioro y a preservar la integridad estructural de todos los elementos del camino durante su vida de diseño.</p> <p>Esto coadyuva a proteger al máximo las inversiones del capital público y es la base de un buen sistema de administración del mantenimiento.</p>	<p>Los análisis económicos muestran que las inversiones en mantenimiento presentan tasas de retorno elevadas, por cuanto el impacto es inmediato dado que los beneficios se comienzan a recibir a corto plazo.</p>

NOTAS BREVES SOBRE LA HISTORIA DEL MANTENIMIENTO DE LA RED VIAL NACIONAL

“En cuanto a la conservación de las carreteras, se ha adelantado mucho en su eficacia, especialmente en las de carácter nacional, pero también puede anotarse que no se tiene el criterio de mantenerlas siempre como si se acabaran de construir, y las más de las veces, hasta que no estén completamente impasables no se piensa en repararlas. Calcúlese el costo de estas reconstruccio-

nes y compárese con lo que costaría una conservación continua, metódica y oportuna”⁶.

Estas atinadas palabras, por actuales que parezcan, no pertenecen a ningún discurso o artículo reciente.

6. Jorge Triana (diciembre de 1936). Nuestras carreteras. *Revista Técnica Cemento 1*. Bogotá: Compañía Distribuidora de Cementos Colombianos.

Las escribió el ingeniero Jorge Triana, profesor de la Universidad Nacional, en noviembre de 1936. Y si hace 80 años se tenía el mismo parecer que hoy, no cabe concluir otra cosa sino que el mantenimiento de la red vial nacional ha desempeñado un rol secundario, posiblemente desde la creación misma del Ministerio de Obras Públicas, en enero de 1905.

La década de los cincuenta del siglo precedente fue un periodo de notable expansión del transporte en Colombia. El transporte por agua y ferrocarril prácticamente se duplicó; el transporte aéreo creció de tal manera que se constituyó en el principal medio de movilización de pasajeros; el número de vehículos automotores se triplicó y su proporción por cada mil habitantes pasó de 5 a 12. En esta prosperidad, mucho tuvieron que ver los Planes Viales 1 y 2 puestos en marcha como resultado de las recomendaciones del “Comité de Desarrollo” creado por el Decreto 2838 de 1950, a instancias del Banco Mundial y de la llamada Misión Currie que en ese momento se encontraba en el país.

Los resultados alcanzados al destinar parte importante de los recursos de la nación a la infraestructura del transporte se hicieron evidentes en el desarrollo conseguido por el país en esa década. El PIB aumentó 58 % y bienes que antes no se podían emplear por carencia de medios de transporte, se hicieron disponibles para el crecimiento de la economía.

Esta evolución tuvo, sin embargo, un alto costo social. Durante ese periodo, Colombia no pudo proporcionar a sus habitantes escuelas ni hospitales adecuados, ni satisfacer las crecientes demandas de viviendas de bajo costo, agua potable, alcantarillado y otros servicios públicos indispensables. La educación quedó rezagada, aumentaron los cinturones de miseria en las grandes ciudades y se produjo un profundo desequilibrio en el programa nacional de desarrollo, lo que obligó al gobierno nacional a reducir sustancialmente el apoyo a la actividad del transporte en la década siguiente, con el fin de vigorizar los programas que se encontraban más desatendidos.

Debido a ello, las inversiones en infraestructura se redujeron sustancialmente en relación con lo previsto en los planes nacionales de desarrollo y el avance en el mejoramiento de la red vial se hizo tan escaso que en el primer lustro de la década de los sesenta sólo se pavimentaron 985 km, en contraste con los 1800 km

que se habían pavimentado en los últimos cinco años de la anterior.

A causa de la situación imperante que, además, conspiraba contra las carreteras construidas en los años cincuenta por falta de un mantenimiento adecuado y por encontrarse muchos de sus pavimentos próximos a cumplir su periodo de diseño, el gobierno logró poner en marcha el Fondo Vial Nacional, estableció un impuesto de destinación específica a los combustibles y reestructuró el Ministerio de Obras Públicas con la asesoría de la consultora mexicana-americana Comec-Harris.

Como parte de esa reestructuración se crearon 18 Distritos de Conservación de Carreteras, dependientes jerárquicamente de la nueva Dirección de Conservación del Ministerio. Las funciones de los Distritos quedaron plasmadas en la circular N.º 33, publicada el 15 de julio de 1969. La principal de ellas era conservar las carreteras, puentes y obras conexas a su cargo.

Los Distritos de Conservación cumplieron una gran labor durante los primeros años de su existencia, debido al compromiso del personal operativo y al hecho de que contaban con ingenieros de gran capacidad técnica, pues mientras algunos venían de participar en los proyectos de los Planes Viales 1 y 2, las vacantes se cubrieron con profesionales jóvenes bien calificados, la mayoría de ellos egresados del único curso de especialización en vías terrestres que existía en ese momento en el país, el cual se dictaba desde 1969 en la Universidad del Cauca con el apoyo de maestros y doctores mexicanos, en cumplimiento de una de las recomendaciones de la Misión que adelantó la reestructuración del Ministerio.

A mediados de 1980, y tras detectar pérdidas de eficiencia en las labores de mantenimiento de los Distritos por falta de una adecuada organización, el Ministerio confió a la compañía consultora francesa Societé Nouvelle Ingeroute la misión de estudiar, probar e implantar un sistema de administración del mantenimiento de carreteras pavimentadas, con el fin de garantizar de manera permanente un buen servicio a los usuarios de la red vial nacional, aprovechando los recursos de un crédito suministrado por el Banco Mundial. El trabajo, que se realizó durante dos años, comprendió la ejecución de estudios de costos de mantenimiento vial, la organización de los almacenes de repuestos de los Distritos, la sistematización de la información sobre equipos, almacenes y costos, la optimización de los

equipos y talleres, la implementación de un sistema de administración del mantenimiento de las vías pavimentadas y la capacitación del personal. Para la ejecución de su trabajo, el consultor dispuso de cuatro Distritos piloto: Bolívar, Boyacá, Cundinamarca y Valle del Cauca.

Uno de los primeros hallazgos del consultor, que incidiría sobre el devenir de los Distritos de Obras Públicas y sobre el del mismo Ministerio, se resume en esta frase: “Los recursos asignados al mantenimiento vial son excesivamente bajos y una parte muy importante del presupuesto correspondiente está destinada a los gastos de personal”⁷.

Aunque Ingeroute logró crear e implementar el sistema de administración del mantenimiento, éste no prosperaría por cuanto, como lo dice una de las conclusiones del informe resumen que presentó uno de los miembros de la consultoría, el ingeniero Patrice Retour, “la acogida a estos proyectos fue excelente a nivel de base: inspectores de carreteras e ingenieros de los distritos pilotos participaron activamente y con entusiasmo en las diferentes pruebas y propusieron, cada uno a su nivel, adaptaciones astutas. En cambio, es necesario admitir que a nivel central la acogida fue muy restringida; esto se debe, sin duda, a la inestabilidad de los ingenieros colocados en los niveles de decisión y a la interferencia que inevitablemente ello tiene con los programas en vías de ejecución”⁸.

Así, en 1984, ante la insatisfacción con el rendimiento que se estaba logrando en la conservación rutinaria por administración directa debido a la continua pérdida de eficiencia de los Distritos, el Ministerio decidió probar suerte a través de microempresas asociativas, un sistema calificado por sus promotores como “novedoso y autóctono”⁹, aunque, en el entender de quien ha escrito estas líneas, inspirado en la figura del peón caminero creada en España en 1759, durante el reinado de Fernando VI.

El sistema, que contó inicialmente con mucha resistencia, especialmente de parte de los sindicatos del Ministerio que veían amenazados los intereses de sus afiliados, se logró iniciar con 28 microempresas que atendieron ese año 1531 km y se fue consolidando con el tiempo, a la vez que se encontraba que el costo del mantenimiento rutinario resultaba, año tras año, más económico que el ejecutado por administración directa. El número de microempresas llegó a 398 durante el último año de vida del Ministerio con la sigla MOPT, instante en el cual atendían 21.525 km. En la actualidad sigue vigente, y el Invías tiene contratadas 249 microempresas, número menor que el anterior en razón de que la longitud de red que atiende la entidad es inferior a la que tenía a cargo el MOPT durante sus últimos años de gestión.

“La revolución pacífica”¹⁰, como se llamó el Plan de Desarrollo Económico y Social del gobierno de César Gaviria, iniciado el 7 de agosto de 1990, consideró que los requerimientos de la infraestructura de transporte como instrumento básico para el programa bandera de apertura económica del gobierno y para la ejecución del plan de inversiones en carreteras durante la última década del siglo XX exigían modificaciones de fondo en la estructura del sector.

Uno de los argumentos para mejorar la eficiencia consistía, según el Plan, en disminuir los costos de la conservación vial. La posibilidad de hacerlo se basaba no sólo en las conclusiones del informe final de la misión Ingeroute, sino también en la comprobación de que el costo del mantenimiento rutinario realizado por las microempresas resultaba mucho menor del que implicaba su ejecución directa por parte de los Distritos, agravado esto último por el hecho de que los Distritos no descontaban dicha actividad de su presupuesto a pesar de no realizarla, dado que les resultaba imposible desprenderse de sus trabajadores ociosos, todos ellos sindicalizados.

La responsabilidad de que se hubiera llegado a este punto no se puede atribuir, sin embargo, exclusivamente a la voracidad de los jefes de los sindicatos del Ministerio, sino también, y en gran medida, a la complacencia de las administraciones anteriores de éste, que suscribieron

7. Patrice Retour (1985). *Mantenimiento vial en Colombia. Misión Francesa 1980-1982*. París: Institut des sciences et des techniques et de l'environnement pour le développement (Isted).
8. *Ibidem* 7.
9. Martha Inés Lobo Soler (1993). *Mantenimiento y conservación de vías a través de microempresas asociativas*. Popayán: Memorias del Primer Seminario Regional del Programa de Mantenimiento Vial (Provincial) para los países del Grupo Andino y Panamá, 9 al 13 de agosto.

10. Presidencia de la República (1991). *La revolución pacífica. Plan de Desarrollo Económico y Social 1990-1998*. Bogotá, D.C.: Departamento Nacional de Planeación.

convenciones colectivas accediendo a muchas de las peticiones exageradas de los pliegos de los trabajadores, engendrando así una auténtica oligarquía de overol y sin preocuparse de que con estas concesiones endeudaban no sólo a su administración y a la siguiente sino, probablemente, también a la próxima generación.

Tomando el toro por los cuernos, el gobierno del señor Gaviria determinó que las carreteras que fueran verdaderamente nacionales siguieran a cargo de la nación, pero independizando su administración dentro del Ministerio, para permitir que éste se convirtiera únicamente en planificador y supervisor de las actividades del sector transporte. Igualmente, determinó que las actividades de conservación se deberían contratar en su totalidad, haciendo así innecesarios los Distritos de Obras Públicas y las Regionales del Fondo Nacional de Caminos Vecinales.

Estas decisiones quedaron en firme a través del Decreto 2171 del 30 de diciembre de 1992, por medio del cual se reestructuraron el Ministerio de Obras Públicas y Transporte como Ministerio de Transporte, y el Fondo Vial Nacional como Instituto Nacional de Vías, y se determinó que la construcción y la conservación de la infraestructura de transporte no podrían ser ejecutadas en forma directa por el Instituto Nacional de Vías y, en consecuencia, en todos los casos, éste debería contratar la construcción y la conservación de la infraestructura de transporte de su competencia.

El plazo para adecuar al decreto la estructura del Ministerio y de las entidades adscritas y vinculadas venció el 31 de diciembre de 1993 y, por lo tanto, las vidas del Ministerio como Ministerio de Transporte y del Fondo Vial como Instituto Nacional de Vías comenzaron el 1.º de enero de 1994.

Una vez puesto en marcha el Instituto, la prioridad en la gestión de la Secretaría Técnica de la nueva entidad fue el mantenimiento de carreteras. Al efecto, esa dependencia diseñó el Plan para la conservación del patrimonio vial de Colombia, conocido como Provia Colombia¹¹, y elaboró un documento de lanzamiento donde, parafraseando el texto del Plan Nacional de Desarrollo del gobierno de Ernesto Samper (El salto so-

cial)¹², se afirmaba que “El principal problema del sector vial colombiano es el avanzado estado de deterioro de la red actual y de la mayoría de los puentes, que ha sido causado por una política inadecuada de mantenimiento” y que “se garantizará la rehabilitación y mantenimiento de la totalidad de la red troncal y recursos adecuados para emergencias y para estudios y diseños de todas las inversiones”. El documento hacía un profundo y descarnado análisis de la situación de la red vial en ese momento, reconociendo que no existía en nuestro medio una cultura en favor del mantenimiento y proclamando que los recursos presupuestales con destino al mantenimiento vial constituían una gran inversión financiera y una buena estrategia de servicio social.

El Provia Colombia pasaba por considerar la infraestructura vial no como un fin en sí mismo, sino como un medio necesario e indispensable, aunque no suficiente, para el desarrollo socioeconómico del país, para lo cual era imprescindible, conforme lo había previsto el Plan Nacional de Desarrollo del gobierno precedente, dar paso a ideas como la descentralización, la regionalización y la ejecución privada de muchas de las actividades que antes se entendían como propias de las funciones del gobierno central.

El Provia Colombia consideró dos escenarios en relación con el mantenimiento: el de las condiciones propicias y el de las condiciones desfavorables. Según las favorables, en un plazo de solamente dos años a partir de 1995, el 75 % de la red nacional pavimentada estaría en buen estado, el 20 % en regular estado y sólo el 5 % en mal estado, en tanto que en la red no pavimentada las proporciones serían 80, 20 y 0 %, respectivamente. En el escenario pesimista se esperaba lograr que el 65 % de la red pavimentada presentara buen estado, el 25 % una condición regular y el 10 % mal estado, en tanto que en la red no pavimentada las proporciones deseadas eran 50, 30 y 20 %, respectivamente.

De acuerdo con un informe titulado “Memoria de una gestión eficiente”¹³, durante el cuatrienio 1994-1998 el Instituto sólo recibió el 63 % de los recursos contemplados en el Plan Nacional de Desarrollo, y

11. Instituto Nacional de Vías (1995). Plan para la conservación del patrimonio vial de Colombia 1995-1996. Provia Colombia. Rionegro, Antioquia, 22 al 25 de febrero.

12. Presidencia de la República (1994). El salto social. Plan Nacional de Desarrollo 1994-1998. Bogotá: Departamento Nacional de Planeación.

13. Instituto Nacional de Vías (julio de 1998). Memoria de una gestión eficiente. Revista *Noticias*, 42. Bogotá, D.C.

aunque, a pesar de ello, la expectativa optimista se cumplió para la red pavimentada (76 % bueno, 20 % regular, 4 % malo), debido en buena parte a los más de 1000 km rehabilitados o construidos por el sistema de concesión que en ese momento estaba a cargo de la entidad, la condición de la red no pavimentada estuvo lejos de satisfacer siquiera la expectativa del escenario pesimista: 35 % en buen estado, 40 % en estado regular y 25 % en mal estado.

La drástica reducción en los recursos asignados a la infraestructura vial tuvo su origen en el escándalo político más sonado de los últimos 50 años, conocido popularmente como el Proceso 8000¹⁴, que motivó que el gobierno nacional, en su afán por sostenerse, cambiara las prioridades de la sociedad por las suyas propias. Debido a ello, la población colombiana vio deslegitimada la autoridad del Estado y de las instituciones¹⁵ y, por supuesto, no vio disminuir en cuatro años los niveles de pobreza, como lo prometió el Plan de Desarrollo¹⁶, ni salir al país del atraso tecnológico, como tampoco materializar las expectativas del Invias en relación con el estado de las carreteras nacionales¹⁷.

Con motivo del cambio de gobierno nacional en agosto de 1998, a cuyo sillón presidencial llegó, precisamente, el mayor detractor del presidente anterior, una de las primeras acciones de la nueva administración del Instituto Nacional de Vías fue sepultar el Provia Colombia. Desde entonces, el Instituto ha pasado por diversas administraciones que, sin un plan estratégico muy definido, han sostenido algunas de las modalidades de contratación del mantenimiento vial implantadas durante la primera administración o, incluso, heredadas del antiguo Ministerio de Obras Públicas y Transporte, con éxito variado, pero ciertamente inferior al esperado, a la luz de las cifras que sobre el estado de 8800 km de carreteras nacionales reportó el Instituto el año precedente: red pavimentada: 67 % bueno o muy bueno, 28 % regular y 15 % malo o muy malo. Red no pavimentada: 10 % bueno o muy bueno, 38 % regular y 52 % malo o muy malo¹⁸.

14. Revista *Semana* (2007). El Proceso 8000, 23 de junio.

15. https://es.wikipedia.org/wiki/Proceso_8000.

16. *El Tiempo* (1997). El salto social: muchas promesas incumplidas, 20 de noviembre.

17. *Ibidem* 13.

18. <https://www.invias.gov.co/index.php/red-vial-nacional/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>.



Figura 3. Portadas de los dos volúmenes del *Manual de mantenimiento de carreteras*.

EL MANUAL DE MANTENIMIENTO DE CARRETERAS

El objetivo del *Manual de mantenimiento de carreteras* del Instituto es establecer criterios, procedimientos y recomendaciones por aplicar para la gestión del conjunto de actividades técnicas de naturaleza rutinaria y periódica que se deban adelantar en las carreteras nacionales no concesionadas, incluyendo puentes, túneles y elementos accesorios, de manera que alcancen y mantengan un nivel de servicio adecuado para los usuarios.

Con su elaboración y difusión el Instituto no pretende, sin embargo, que los criterios expuestos en él limiten el accionar del ingeniero ni replacen el criterio profesional fundado en su experiencia y conocimiento al momento de tomar decisiones en los aspectos relacionados con el ámbito del mantenimiento de carreteras.

Teniendo en cuenta que el Ministerio de Transporte acostumbra adoptar como normas técnicas de obligatorio cumplimiento los manuales que publica el Instituto, se decidió dividir este *Manual* en dos volúmenes claramente diferenciados: el primero, con criterios generales que, dado su carácter de criterios, pueden ser o no compartidos por los usuarios del documento y, por tal motivo, se busca que su contenido sirva fundamentalmente de información y de guía. El segundo, por el contrario, es de carácter normativo e incluye las especificaciones generales para los contratos de mantenimiento que suscriba en el futuro la entidad mediante la modalidad de precios unitarios.

La idea de separar claramente en el *Manual* los criterios generales de las especificaciones tiene por finalidad reducir al mínimo reclamaciones y conflictos

derivados de su uso, antaño inimaginables pero ahora muy frecuentes, considerando que hoy el mundillo de la construcción y el mantenimiento de carreteras en Colombia se agita más en los bufetes de los abogados, en los círculos bancarios y en los estrados judiciales que en las oficinas dedicadas a la ingeniería.

El primer volumen del *Manual*, el eminentemente informativo, consta de siete capítulos, cinco anexos y un glosario, a saber:

- **Capítulo 1. Aspectos generales.** En este capítulo se describe la importancia del mantenimiento vial, se reseñan los principales efectos del cambio climático y de las deficiencias geométricas y de drenaje sobre el mantenimiento de las carreteras, se presentan algunos criterios que hay que considerar para garantizar la seguridad de los trabajadores y de los usuarios durante la ejecución de los trabajos de mantenimiento, y se incluyen recomendaciones para mitigar los impactos negativos que pueden producir sobre el ambiente las actividades relacionadas con el mantenimiento de las carreteras.
- **Capítulo 2. Institucionalidad para el mantenimiento de la red vial nacional no concesionada.** En él se recuerda la misión del Instituto Nacional de Vías, se describe la manera como se enfrenta el mantenimiento de la red vial nacional con su organización administrativa actual, se analizan de manera somera las características de la red no concesionada y se clasifica el mantenimiento en función de las características del trabajo y de la periodicidad con que se requiere ejecutarlo, en rutinario, periódico y de urgencia.
- **Capítulo 3. Modalidades para la ejecución del mantenimiento de la red vial nacional.** Expone las modalidades de contratación que ha utilizado el Instituto Nacional de Vías durante su existencia para llevar a cabo las labores de mantenimiento de las carreteras a su cargo y se mencionan las fortalezas y debilidades que se han encontrado al aplicar cada modalidad.
- **Capítulo 4. Gestión del mantenimiento vial.** Este capítulo incluye una descripción de los principales criterios, procedimientos y requerimientos de los sistemas de administración que aprovechan las técnicas más recientes para planificar y evaluar el mantenimiento de las carreteras y puentes, y describe, de manera muy somera, las herramientas de apoyo a la

gestión de la infraestructura vial con que cuenta el Instituto, el HDM 4 y el Sipucol. No se consideraron indispensables el desarrollo y la implementación de un verdadero sistema de gestión del mantenimiento vial propio del Instituto, tanto porque los recursos disponibles para la ejecución del proyecto no lo permitían, como por el hecho de que la organización estructural de la entidad ha sido demasiado cambiante en el tiempo, y la experiencia de los últimos 20 años indica que los planes gerenciales respecto de la infraestructura de transporte no suelen extenderse más allá de un periodo de gobierno.

- **Capítulo 5. Necesidades de mantenimiento.** Este capítulo presenta un compendio de los principales elementos constitutivos de las carreteras, analiza sus necesidades de inspección y mantenimiento permanente y relaciona algunas de las actividades requeridas para su mantenimiento rutinario y periódico. También brinda algunos conceptos generales en relación con la atención de las emergencias que se presenten en la red vial nacional no concesionada. Teniendo en cuenta que el Instituto cuenta con manuales específicos sobre taludes y túneles, así como con procedimientos para la inspección de puentes en Sipucol y en un manual elaborado para la entidad por la Universidad Nacional, todos ellos vigentes y de gran valor técnico, en la redacción de este manual se prefirió hacer alusión a ellos en lugar de copiar algunas de sus partes o de redactar procedimientos alternativos y presentar otros formularios para el registro de las inspecciones, que pudieran causar más confusión que claridad a los usuarios del conjunto de documentos técnicos de la entidad.
- **Capítulo 6. Relación entre la condición de las calzadas pavimentadas y no pavimentadas y las necesidades de mantenimiento.** Considerando la preponderancia que ha tenido la atención de las calzadas pavimentadas y no pavimentadas dentro de la globalidad del mantenimiento de las carreteras en el Instituto, este capítulo trata en detalle los aspectos referentes a la evaluación de su condición y a las necesidades de mantenimiento. En relación con las carreteras con pavimento asfáltico, se buscó que lo redactado fuera concomitante con lo expuesto en la guía para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de la entidad.
- **Capítulo 7. Técnicas y estrategias para el mantenimiento de las calzadas pavimentadas y**

no pavimentadas. En este capítulo, último del primer volumen, se describen con algún detalle las técnicas usuales para el mantenimiento de las calzadas pavimentadas y en afirmado, según su estado funcional y estructural, su vida residual estimada y la importancia de la carretera, y se relacionan dichas técnicas con las actividades de mantenimiento especificadas en el segundo volumen del *Manual*.

Los anexos, como ya se mencionó, son cinco:

- **Anexo 1. Determinación del índice de deterioro superficial de un pavimento asfáltico mediante el método Vizir.** En él, se transcribe la norma INV E-813, adoptada por el Instituto como base para las inspecciones de las superficies de sus pavimentos asfálticos, cuya aplicación permite obtener un índice numérico que valora la condición superficial del pavimento a partir del tipo, la gravedad y la densidad de los deterioros de origen estructural que presenta su superficie. Dado que la norma INV E-813 forma parte de las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, adoptadas por el Ministerio de Transporte mediante la resolución 1375 del 26 de mayo de 2014, el contenido de este anexo se debe considerar como normativo pese a encontrarse en el primer volumen del Manual.
 - **Anexo 2. Determinación del índice de condición de un pavimento rígido.** Habida cuenta de que el Instituto no ha normalizado hasta la fecha un método específico para la inspección y la evaluación de los pavimentos rígidos a su cargo, para los efectos de este manual se consideró el uso del Índice de Condición de Pavimentos (PCI), descrito en la norma ASTM D 6433, el cual ha sido muy utilizado por los ingenieros del país, principalmente en la inspección y la evaluación de pavimentos rígidos urbanos. El Anexo describe la manera de determinar este índice.
 - **Anexo 3. Determinación del índice de condición de un pavimento de adoquines de concreto.** El Instituto tampoco ha normalizado un método específico para la inspección y la evaluación de los pavimentos de adoquines de concreto. Para suplir esa carencia, y a pesar de que los tramos de la red con este tipo de pavimento son contados, en este Anexo se describe el procedimiento para determinar su índice de condición PCI.
 - **Anexo 4. Descripción del método Viziret para la calificación de la condición de un afirmado.** Las carreteras no pavimentadas constituyen la mayor proporción de la red a cargo del Instituto. El documento propone el empleo del sistema francés de inspección y clasificación Viziret para determinar la condición de las calzadas en afirmado, a partir de la inspección visual de su superficie y de la calificación de los deterioros catalogados por el sistema como estructurales. El Viziret presenta como ventajas en relación con otros sistemas sobre el mismo tipo de superficie, tanto su sencillez como el hecho de haber sido desarrollado a partir de la inspección de miles de kilómetros de vías no pavimentadas en varios países tropicales.
 - **Anexo 5. Consideraciones sobre el diseño de mezclas asfálticas en caliente de gradación continua mediante el método Marshall.** La experiencia de quien ejerció la dirección del proyecto, tanto durante tres décadas como funcionario público, como en el posterior ejercicio ocasional de la consultoría, lo llevó a inferir, desde hace bastante tiempo, que a pesar de que las mezclas de concreto asfáltico son las más empleadas en las labores de construcción, mantenimiento periódico y rehabilitación de los pavimentos de las carreteras nacionales, en sus diseños, que se realizan prácticamente en su totalidad a partir del método Marshall, se incurre de modo habitual en imprecisiones que afectan los resultados y, por ende, el comportamiento de las mezclas una vez instaladas en las obras. Por otra parte, si bien las normas de ensayo del Instituto describen las pruebas que conforman el método, no lo hacen de manera integrada, lo que no facilita la correcta interpretación de sus resultados en conjunto.
- Con el fin de subsanar ese vacío, con la autorización de la Supervisión se decidió incluir este último anexo, en el cual se describe de la manera más didáctica posible todo el procedimiento para el diseño de una mezcla en caliente de gradación continua empleando el método Marshall, incluyendo, además, comentarios y recomendaciones sobre los factores adicionales que hay que considerar para que la elección del porcentaje óptimo de asfalto sea correcta, dependiendo de las condiciones en las que la mezcla deba prestar servicio en relación con el clima y la agresividad del tránsito esperado.

El primer volumen del *Manual* termina con un glosario, en el que se definen algunos de los términos empleados, con el fin de precisar su significado en el sentido en el que se mencionan dentro del *Manual*.

El segundo volumen, como ya se ha dicho, contiene especificaciones generales para el mantenimiento de carreteras e incluye un conjunto de actividades por emprender en desarrollo de los mantenimientos rutinario y periódico de los elementos constitutivos de las carreteras de la red nacional no concesionada.

Quien tenga oportunidad de leerlas advertirá que ellas, por sí solas, no ofrecen un registro completo de los procesos y procedimientos relacionados con las actividades de mantenimiento incluidas, por lo que siempre se deberán leer e interpretar en conjunto con las especificaciones generales de construcción de carreteras y las normas de ensayo de materiales del Instituto. Además, notará que a pesar de que el número de actividades que comprende el mantenimiento de una carretera es casi ilimitado, el documento solamente incluye un poco más de un centenar. Por tal motivo, todas aquellas actividades que se deban realizar en desarrollo de un contrato determinado y no se encuentren incluidas en este volumen se deberán ejecutar de acuerdo con lo que establezcan las especificaciones particulares aplicables, las cuales prevalecerán sobre las generales y, como ha ocurrido siempre, podrán modificarlas o complementarlas.

El volumen 2 especifica un total de 115 actividades de mantenimiento, como se resume a renglón seguido (tabla 3).

Tabla 3
Número de actividades especificadas en el *Manual de mantenimiento de carreteras*

Elemento	Número de actividades de mantenimiento (especificaciones)		
	Rutinario	Periódico	Total
Derecho de vía	19	6	25
Pavimentos	10	19	29
Afirmados	4	3	7
Obras de drenaje	5	6	11
Seguridad vial	13	3	16
Puentes	7	9	16
Túneles	8	3	11
Total	66	49	115

Se dirá, con razón, que el volumen abarca un número muy reducido de actividades, crítica aceptable si se tiene en cuenta, por ejemplo, que hace 20 años una asesoría de la Dirección de Carreteras de Dinamarca, contratada por el Instituto para elaborar e implantar un sistema de administración de puentes, hizo una lista de las actividades que en ese momento el Instituto consideraba como posibles para el mantenimiento vial y su número era 218, por lo que es probable que hoy día esa lista sea mucho más extensa.

Hay varias causas para que exista esa diferencia. Una de ellas es que en la lista se contemplaban actividades que implicaban el uso de asfaltos líquidos para la elaboración de mezclas y todo tipo de riegos y en la actualidad el Instituto sólo permite el empleo de estos asfaltos en la ejecución de imprimaciones. Además, la lista incluía actividades típicas de construcción y de rehabilitación, como la construcción de terraplenes, los ensanches de banca, la reposición de capas granulares de base y subbase, las excavaciones en material común y roca, la construcción de muros, alcantarillas de cajón y tubo y pontones, así como el transporte de materiales y de maquinaria, la auscultación de las calzadas, ejecución de inventarios y otras acciones que no se contemplaron en el nuevo documento en razón del alcance que se le fijó.

Dada esta diferencia en el número de actividades de mantenimiento consideradas y para determinar objetivamente si, en efecto, el alcance del volumen 2 del *Manual* es muy limitado o no, se comparó el número de especificaciones incluidas en él con las contenidas en los manuales de mantenimiento vigentes en algunos países de Latinoamérica y ultramar. La comparación permitió concluir que el número de especificaciones incluidas en el documento del Instituto resultaba perfectamente razonable (tabla 4).

Aparte de las especificaciones, el volumen 2 tiene un primer numeral, el 1000, titulado “Aspectos generales”, en el que se presentan las definiciones aplicables al documento, se citan los manuales, especificaciones y normas de referencia y consulta, se describen las responsabilidades del contratista de mantenimiento, se exponen conceptos generales sobre el desarrollo de los trabajos y sobre la supervisión de éstos, se citan los aspectos ambientales básicos que hay que tener en cuenta y se presentan consideraciones sobre la medida y el pago de los trabajos de mantenimiento.

Tabla 4

Número de especificaciones de mantenimiento incluidas en los manuales de mantenimiento vial de varios países

País	Rutinario	Periódico	Sin discriminar	Total
Colombia	66	49	-	115
Chile	43	49	-	92
Perú	47	47	19	113
México	28	38	1	67
Bolivia	-	-	85	85
Brasil	-	-	45	45
Botswana	-	-	167	167

El número de especificaciones de Botswana es muy alto, por cuanto considera algunas actividades que no son muy usuales en el concierto latinoamericano en relación con el mantenimiento de carreteras o que exceden el alcance de los mantenimientos rutinario y periódico. Por ejemplo: remoción de hormigueros, reparación de portones, actividades de mantenimiento en áreas de descanso, control de topes, retiro de animales vivos de la zona de la vía, mantenimiento de senderos de bicicletas, reparación de muelles flotantes para ferries, limpieza de canales, rectificación de cauces, construcción de rellenos, remoción y reconstrucción de alcantarillas de cajón, etc.

En relación con esto último, el documento considera la ejecución de los contratos mediante la forma de pago por precio unitario para las actividades de mantenimiento incluidas en él. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el Instituto puede contratar los trabajos de mantenimiento de sus carreteras a través de varias modalidades (indicadores de mantenimiento, niveles de servicio, precio global mensual por kilómetro, etc.), los pliegos de condiciones deberán definir, en cada caso, las adaptaciones por realizar a las especificaciones del documento cuando se emplee otra modalidad para la medida y el reconocimiento con fines de pago de las actividades de mantenimiento correctamente ejecutadas.

Dado que el mantenimiento está interrelacionado con todos los demás aspectos de la ingeniería de carreteras, el lector deberá considerar siempre el *Manual de mantenimiento de carreteras* en correspondencia con las disposiciones formuladas en los demás manuales técnicos del Instituto Nacional de Vías e, incluso algunos del Ministerio de Transporte, así como con las especificaciones generales y las normas de ensayo de materiales de construcción de carreteras, documentos todos ellos a los que se puede acceder de manera libre y gratuita a través de las páginas electrónicas de estas entidades.

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, 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 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).



Confía en 4-72,
el servicio de envíos
de Colombia

Línea de atención al cliente:
(57 - 1) 472 2000 en Bogotá
01 8000 111 210 a nivel Nacional

.....

www.4-72.com.co