

Desarrollo agrícola frente al posconflicto.

Optimización binivel: nuevas perspectivas de aplicación en la planeación y control de operaciones e inventarios.

La cualidad de desviar en uno: la unidad desde la diferencia.

Análisis de un vertedero triangular de pared delgada con Ansys Fluent.

Cálculo del caudal medio vertido de aguas residuales domésticas en Colombia para el año 2013.

Cambios en los tiempos de permanencia en parada debido al nuevo método de acceso implementado con el Sistema Integrado de Transporte Público.

Planta de tratamiento de agua potable del municipio de Barbosa (Santander).

Uso y aplicación del prPEAD en la fabricación de elementos estructurales para construcción de vivienda en Colombia.

03 Julio - septiembre de 2016

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000.00



CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ

VOCALES MYRIAM ASTRID ANGARTITA GÓMEZ
LUIS GUILLERMO AYCARDI BARRERO
ÁLVARO GONZÁLEZ FLÉTCHER
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
JUAN MANUEL LUNA GORDILLO
(representante de los profesores)
VALENTINA VILLAMIZAR YÁÑEZ
(representante de los estudiantes)

RECTOR GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS

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

La formación necesaria

Ricardo Rincón Hernández

7-17

Desarrollo agrícola frente al posconflicto

Eduardo Sarmiento Palacio - Eduardo Sarmiento Gómez

La evolución de la agricultura en Colombia es insatisfactoria. El agro representa el 16 % del empleo y genera el 6 % del ingreso; el ingreso per cápita es la tercera parte del promedio nacional. Adicionalmente, más de la mitad de la población del sector rural está expuesta a la pobreza.

19-27

Optimización binivel: nuevas perspectivas de aplicación en la planeación y control de operaciones e inventarios

Carlos Rodrigo Ruiz Cruz - William Javier Guerrero Rueda - Sonia Alexandra Jaimés Suárez - Angélica Sarmiento Lepesqueur

En este artículo se exploran posibles campos de aplicación de la optimización binivel, en particular como apoyo a la toma de decisiones en la planeación y control de operaciones e inventarios. Se presenta una visión general de las características de esta técnica y diferentes contextos prácticos en los cuales se ha utilizado.

29-35

La cualidad de desviar en uno: la unidad desde la diferencia

Felipe Rodríguez Gómez

En este artículo se presentan varias consideraciones sobre la educación que se imparte en las universidades en Colombia. Se plantea la necesidad de la construcción de un sistema educativo coherente con los retos planteados por la sociedad actual; invita a pensar en una educación incluyente en la que el contexto colombiano y su diversidad, hacen del medio universitario un espacio que posibilite la resolución de conflictos.

37-46

Análisis de un vertedero triangular de pared delgada con Ansys Fluent

Andrés Humberto Otálora Carmona - Germán Ricardo Santos Granados

En este artículo se presenta la modelación computacional en tres dimensiones de un vertedero triangular de pared delgada sin contracciones, utilizando el software de mecánica computacional de fluidos (CFD) Ansys Fluent. Se describen las características del modelo computacional, tales como las consideraciones geométricas, el mallado, el esquema numérico y los parámetros de la modelación de la turbulencia.

47-56

Cálculo del caudal medio vertido de aguas residuales domésticas en Colombia para el año 2013

Diego Armando Gallego Muriel - Jairo Alberto Romero Rojas

El caudal de aguas residuales domésticas en Colombia para el 2013 se calculó utilizando la información de consumos medidos por suscriptor del servicio de agua potable, de unos municipios seleccionados, estimando un caudal medio por habitante con una probabilidad de ocurrencia del 99 %.

57-62

Cambios en los tiempos de permanencia en parada debido al nuevo método de acceso implementado con el Sistema Integrado de Transporte Público

Fernanda Bautista Bautista - Carlos Felipe Urazán Bonells

La simulación de algunas medidas, como el uso de buses de plataforma baja, puertas anchas en los buses y pago anticipado del pasaje en estación, mostró que se podría ahorrar un 50 % de tiempo total de parada respecto a la actual situación del SITP.

63-72

Planta de tratamiento de agua potable del municipio de Barbosa (Santander)

Rafael Yamid Quintero Sánchez - Jairo Alberto Romero Rojas

La PTAP de Barbosa tiene capacidad de tratar 120 L/s. En este artículo se confrontan los parámetros de diseño y operación con la normativa vigente, y se determina su conformidad con los parámetros de funcionamiento y las características de calidad de agua tratada.

73-91

Uso y aplicación del prPEAD en la fabricación de elementos estructurales para construcción de vivienda en Colombia

Jorge Andrés Sierra Jiménez

Mediante esta investigación se estudia la factibilidad del uso de material plástico polietileno de alta densidad (PEAD) reciclado (prPEAD) en la fabricación de elementos estructurales (EE) para la construcción de vivienda en Colombia, al tiempo que se analiza una posible solución al déficit de accesibilidad a vivienda para personas de bajos recursos y en caso de emergencia, mediante la construcción rápida de viviendas sostenibles a base de prPEAD.

93 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

La formación necesaria

RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ

Presidente del Claustro y del Consejo Directivo

ricardo.rincon@escuelaing.edu.co

En razón de los rápidos avances tecnológicos y la necesidad de construir una sociedad más equilibrada, la preparación del profesional del futuro constituye un tema recurrente que, por su trascendencia, debe estudiarse lo más pronto posible, pero de manera pausada y cuidadosa.

El objetivo de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, como se establece en la Declaración de Principios, sigue siendo “formar profesionales cuyas características distintivas sean la alta preparación técnica y el espíritu de solidaridad social”, lo cual garantiza que los egresados de la Escuela se destaquen por su preparación, honradez y honestidad en su ámbito de trabajo, cualquiera que éste sea.

Para pensar en el futuro hay que ubicarnos en un presente sostenible y confiable, derivado de nuestra historia, por lo cual resulta indispensable conocer cómo se ha venido actuando y, a partir de ello, identificar las verdaderas necesidades de nuestra sociedad, no sólo desde el punto de vista técnico, sino también reconocer los aspectos que están influyendo en la crisis de principios y valores que afecta a la población en general.

Es clave, por tanto, analizar las posibles deficiencias de la formación actual y estudiar de un modo detallado las exigencias del futuro inmediato, tomando en cuenta, entre otras razones, que el acelerado avance de la tec-

nología está moldeando todos los aspectos que tienen que ver con nuestra profesión.

Es posible, incluso, que en un corto tiempo el adiestramiento técnico que estamos brindando hoy en día sea obsoleto, por lo cual el profesional debe formarse fundamentalmente en los aspectos básicos, que si están bien consolidados, le permitirán evolucionar en todo momento mediante un estudio más simplificado, sin que tenga que iniciar de nuevo los estudios generales de la profesión.

La formación básica en el aspecto técnico estaría en principio garantizada por la calidad de nuestros profesores en el tema específico de su especialidad, por su amplia experiencia profesional, académica y social, al igual que por las oportunidades que se les brindan en la Escuela para que se actualicen permanentemente.

Los cambios sociales que se vienen produciendo, a veces de un modo un poco caótico y que corresponden por lo regular a una influencia general del mundo actual, requieren un análisis profundo, que no corresponde solamente a la formación técnico-científica.

Infortunadamente, parece que el sistema estuviera orientado para que los proyectos se ejecutaran de tal manera que la meta planteada se alcanzara de cualquier modo, es decir, que no importaran los medios para lograrlo. Esto, sin duda, se convierte en un modelo

sinietro, ya que al parecer lo único que interesa es conseguir el objetivo a cualquier precio.

Únicamente con la formación básica que se deriva del ejemplo será posible lograr que en la instrucción que se imparta se tenga en cuenta la necesidad de que los objetivos se alcancen siguiendo siempre el camino recto, aquel que implica lineamientos claros y sin trampas, proyectos bien planteados, controles fundamentados y exigentes, desarrollos de acuerdo con la práctica sana, entregas en el menor tiempo posible, en concordancia con la mejor calidad y planteamiento de un sistema lógico y funcional de mantenimiento.

La institución debe dar ejemplo permanentemente por intermedio de sus directivos y su cuerpo de profe-

sores, ya que las decisiones que se tomen contribuirán en gran medida a la formación integral del estudiante; de ahí la importancia de complementar su crecimiento en aquellos aspectos que constituyen la base fundamental para que, como ciudadano, disponga de las herramientas que le permitan distinguirse en forma íntegra como miembro de la sociedad. Los profesores deben tener presente que lo principal es colaborar con la formación de hombres rectos, antes que individuos dispuestos a obtener los objetivos a cualquier precio.

Nuestros estudiantes deberán formarse para que el estandarte que los acompañe en su vida profesional sea no admitir jamás que el fin justifica los medios.

Desarrollo agrícola frente al posconflicto

EDUARDO SARMIENTO PALACIO¹ - EDUARDO SARMIENTO GÓMEZ²

1. Director del Centro de Estudios Económicos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Consultor privado y profesor de cátedra de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

eduardo.sarmiento@escuelaing.edu.co - esarmientogo@hotmail.com

La evolución de la agricultura en Colombia es insatisfactoria. El agro representa el 16 % del empleo y genera el 6 % del ingreso; el ingreso per cápita es la tercera parte del promedio nacional. Adicionalmente, más de la mitad de la población del sector rural está expuesta a la pobreza. La pobreza y la enorme concentración de la riqueza dan lugar a un coeficiente de Gini de 0,65. Para completar, el sector revela un gran atraso con respecto a otros países de América Latina. En los últimos veinte años creció a un ritmo cercano al 2 %, mientras que Brasil, Perú y Chile lo hicieron por encima. En este periodo, la participación en el producto nacional bajó de 14,0 a 6,2 %.

Infortunadamente, las razones que condujeron a ese estado no se han dilucidado. Las soluciones se buscan dentro de clichés que nunca funcionaron, como aumentar el acceso a la tierra o elevar la productividad. Ambos propósitos se intentaron por diferentes conductos en las últimas dos décadas y fracasaron. Simplemente, los incrementos de productividad no se dieron o resultaron en bajas más que proporcionales de los precios que llevaron a hacerlos retroceder. La información es impresionante: Colombia sólo utiliza 7 de los 22 millones de hectáreas disponibles para las siembras y el uso de riego podría triplicar su productividad. En este contexto, estaríamos ante un clásico estado de oferta totalmente elástica. El país tiene todos los medios y las formas para aumentar la productividad y la producción, pero en la práctica no lo hace porque carece de la demanda necesaria. Los

agricultores saben que la ampliación de las unidades de explotación o la elevación de la producción por hectárea incrementan los costos de producción y los ingresos por la venta de sus productos no los cubren.

Los elevados índices de pobreza se originan en la baja productividad y salarios, en tanto que la inequitativa distribución del ingreso se incuba en la misma pobreza y la enorme concentración de la tierra. En buena parte, las soluciones a la pobreza se encuentran en el mismo sector; en cambio, las causas de la distribución del ingreso están en el conjunto de la economía y el sistema fiscal. La contribución fiscal de los grandes productores no corresponde a los patrimonios y a los rendimientos.

El último Censo Nacional Agropecuario, hecho en el 2014, suministra información valiosa sobre el sector. Lo grave es que no se divisa un panorama diferente para el futuro. No hay un diagnóstico sobre las causas del estancamiento y una visión sobre el futuro.

ESTRUCTURA PRODUCTIVA

La agricultura evolucionó durante cien años con una estructura dual en que coexisten pequeñas y grandes explotaciones. El perfil se ha mantenido con una baja capitalización que ha permitido que los dos tipos de unidades persistan. Así, la producción por hectárea es mayor en las unidades pequeñas. El resultado ocurre porque las grandes invierten menos por unidad de tierra que las pequeñas. El perfil es, a todas luces, ineficiente.

En las actividades altamente intensivas en capital y con elevadas economías de escala, las unidades de mayor tamaño pueden ser más rentables que las pequeñas y estar en capacidad de quedarse con el mercado.

Tanto las pequeñas como las grandes unidades operan con tamaños reducidos, que no se compadecen con la enorme disponibilidad de la tierra. Si el sector dispusiera de mayor inversión, la producción y los ingresos serían mayores.

En Sarmiento (2014) se muestra que las dos explotaciones coexisten porque la menor productividad de los grandes productores se compensa por las economías de escala de los insumos. La función de producción depende de la tierra y el capital que reúne los insumos¹. Allí se observa que la productividad de la tierra está directamente relacionada con la intensidad del capital y con los rendimientos de escala. Así, la tendencia declinante de la productividad de la tierra se compensa por el capital por hectárea y las economías de escala. La productividad decreciente de la tierra se presenta porque la intensidad del capital es baja y las economías de escala son modestas.

El resultado no puede generalizarse para todos los cultivos. En las actividades altamente intensivas en capital y con elevadas economías de escala, las unidades de mayor tamaño pueden ser más rentables que las pequeñas y estar en capacidad de quedarse con el mercado. Es precisamente lo que sucede con las explotaciones de gran tamaño que emplean en forma intensiva el agua y el capital en cultivos claramente identificados, como la soya, el sorgo, el maíz y el arroz.

1. La producción agrícola se puede sintetizar en una función Cobb-Douglas en términos de la tierra y de los insumos reunidos en el capital $y = T^\alpha K^\beta$. Donde y es producción, T tierra, K insumos representados en el capital, y α y β coeficientes. La producción de la tierra está dada por la expresión $y = (T/K)^\alpha K^{\alpha+\beta}$. La productividad decreciente de la tierra es compensada por el capital y las economías de escala ($\alpha + \beta$ mayor que 1).

Esto lo ilustra la experiencia de Brasil, que mediante un sistema mixto liderado por la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (Embrapa), ha conseguido aumentos espectaculares en la productividad de los cereales y la ganadería. El resultado se alcanzó mediante explotaciones de enormes dimensiones que permiten sacar ventaja del uso extensivo de la tierra y el agua, así como las economías de escala en los insumos. Lo cierto es que en la ecorregión del Cerrado lograron productividades similares a las de los países templados en varios cereales y la ganadería, lo que hasta hace un tiempo se consideraba imposible.

En Estados Unidos, la mayor extensión de la producción de granos y oleaginosas implica mayores costos de maquinaria e infraestructura por unidad productiva. En el Censo Agrícola de 2012 se encuentra que el total de productos agrícolas y los granos y oleaginosas, respectivamente, tienen área cosechada por unidad productiva 124,7 ha y 233,6 ha, valor de la maquinaria por unidad productiva US\$191.265 y US\$304.641 y valor de tierra e infraestructura por unidad productiva US\$1.721.567 y US\$2.597.711.

INVERSIÓN

La producción agrícola es determinada por la tierra, los fertilizantes e insecticidas, la mano de obra, el capital, el riego, los caminos de penetración y la maquinaria. La relación se ha estimado por los más diversos conductos y revela un fuerte vínculo con el capital.

En el trabajo más reciente de Chaves (2015) se encuentra que el capital explica menos que la tecnología. Mal podría interpretarse como un indicio de la baja productividad del capital. Se trata, más bien, de una evidencia de la baja utilización del capital. En el gráfico siguiente se observa cómo la participación del capital en el producto agrícola ha venido decreciendo (gráfico 1). La cuantiosa caída deja entrever una cierta inclinación a utilizar los insumos como fertilizantes e insecticidas. Así, en el Censo Nacional Agropecuario de 2014 se observa que mientras el 21,0 % de los campesinos emplean los fertilizantes biológicos y 31,2 % los químicos, sólo el 16,6 % acceden al capital. Dada la enorme relación entre el capital y la mayoría de los insumos, su baja participación reflejaría una distorsión por la financiación y factores de riesgo.

En fin, la estructura agrícola, el Censo Nacional Agropecuario y los estudios econométricos muestran

que el capital del sector es insuficiente. De seguro, una mayor capitalización habría significado el incremento de la producción y de la productividad de la tierra tanto en las explotaciones grandes como en las pequeñas. La explicación está principalmente en la baja elasticidad de demanda. Los productores saben que el aumento de la producción les significa una baja más que proporcional del precio y la reducción de los ingresos.

La deficiencia deja al descubierto la carencia de un marco institucional de inversión pública y privada que reconozca el aislamiento y las características propias de la agricultura. La asignación de fondos estatales disminuyó sistemáticamente en los últimos veinticinco años. Los recursos destinados a estas actividades y el acceso a ellas son muy inferiores a lo observado en Estados Unidos y América Latina. La financiación y los subsidios están en manos de una fuerte administración burocrática. Por su parte, la tecnocracia considera que el principal factor de oferta son las semillas y fertilizantes, y le concede a la inversión un tratamiento secundario.

Por tratarse de actividades con un alto grado de complementariedad con la mayoría de los insumos del sector, la falencia de la inversión pública y privada configura un cuello de botella que interfiere en la producción a todos los niveles. El obstáculo se acentuará en la medida en que se amplíe la demanda y se entre a la producción de bienes temperados, que requieren más inversión por hectárea y son más dependientes del riego y el transporte.

Sin duda, uno de los grandes desafíos será la construcción de un marco institucional que garantice la estabilidad de la inversión pública, amplíe el acceso al sector financiero y le dé algún apoyo a la inversión propia al campesino. Y lo más importante, que se entienda que las principales limitaciones del sector son la demanda y la inversión.

La inversión se ha interpretado como un factor exclusivamente de oferta. No se advierte que al tratarse de una decisión a largo plazo es altamente influenciada por la demanda. Cuando los productores perciben que hay limitaciones de demanda, se abstienen de hacer la inversión para evitar que el aumento de la producción ocasione una caída del precio que reduzca los ingresos.

APERTURA

En todos los estudios se encuentra que la productividad de la tierra, al igual que la totalidad de los factores, au-

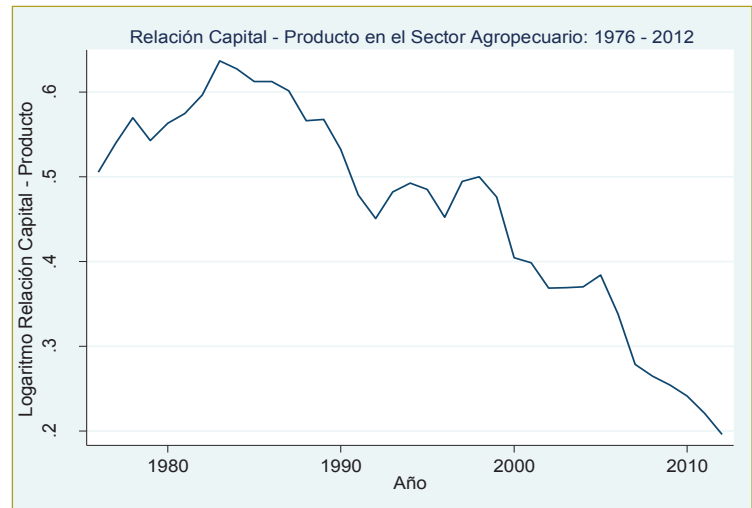


Gráfico 1

Fuente: Álvaro Hernando Chaves (2014). Evolución macroeconómica cuantitativa de la agricultura y transformación estructural, 1976-2012.

mentó entre 1960 y 1990, y decayó entre 1990 y 2015. Sin duda, la apertura fue la gran causante del retroceso agrícola. La explicación es simple y está en todos los documentos publicados en su momento. El experimento provocó el disparo de las importaciones y no afectó mayormente las exportaciones.

Los trastornos de la agricultura obedecen al comercio internacional, que conduce a la especialización en los productos que se pueden cultivar más fácilmente. La liberación del comercio ocasiona una baja productividad de la canasta de producción y una alta productividad de la canasta de consumo por la adquisición de los productos de mayor complejidad en el exterior. La cosa no estaría mal si existiera la demanda, pero sucede que los bienes de mayor productividad absoluta son los más complejos y los más difíciles de producir y, por lo tanto, de mayor demanda. Dicho en términos corrientes, los bienes de menor complejidad son los más fáciles de producir y, por lo tanto, de menor demanda con respecto a la producción. En una economía con limitaciones de demanda, el libre comercio baja la productividad de la canasta de producción a cambio de adquirir los bienes de mayor productividad en el exterior. Como los bienes de menor productividad absoluta son los de menos complejidad tecnológica y de menor demanda mundial, resulta una estructura comercial de baja demanda, es decir, deficitaria, financiada con inversión extranjera, lo que implica bajos niveles de ahorro.

En cierta forma, se confirma la invalidez de la teoría de ventaja comparativa en los países en desarrollo. La especialización en las actividades de mayor ventaja comparativa no garantiza una estructura externa con alta capacidad de expansión, experiencia que se confirma en 1999 y 2015, cuando la economía se precipita en cuantiosos déficits en cuenta corriente que terminan en recesión y alto desempleo.

REDES AGRÍCOLAS

Las redes agrícolas tienen un alto significado empresarial y solidario. Es una forma de extender los beneficios individuales de la educación y de la investigación a los lugares más recónditos de la geografía. Este es uno de los aspectos que más han influido en la elevación de la productividad del sector. Los campesinos se han beneficiado de los descubrimientos de los otros productores y generan sinergias que se transfieren a toda la comunidad.

Sin duda, las redes tecnológicas y de comercialización constituyen los principales avances del sector. En primer lugar, suministran una alta información sobre los precios, disponibilidad de los fertilizantes y semillas y oportunidades de los mercados que les permiten a los agricultores encontrar las condiciones más favorables de productividad y costos. Por lo demás, constituyen un factor de aprendizaje que facilita aprovechar los mayores niveles de educación de los empresarios y un poderoso medio para transmitir a la comunidad los avances individuales del conocimiento e innovación.

La producción agrícola se relaciona con procedimientos de adecuación de tierras, protección de cultivos

y recolección, además de la utilización de insumos como fertilizantes y riego, y la aplicación de maquinaria. Así, las redes han conseguido encontrar la mejor combinación de estos elementos para elevar la productividad y bajar los costos; por lo demás, contribuyen al aprendizaje en el oficio. El efecto no es despreciable; al tiempo que mejora la operación de unidades agrícolas, permite entrar en actividades de mayor complejidad tecnológica. Hace las veces de la escalera tecnológica de la industria, sin necesidad de aranceles. Por su parte, las redes de comercialización facilitan el almacenamiento de la producción, la venta oportuna de los productos y la apropiación adecuada de los precios finales. En la venta de productos, los pequeños productores pueden mejorar sus condiciones en alianzas con los supermercados, plazas de mercado y tenderos de barrio dentro de acuerdos a largo plazo.

En fin, las redes de producción y comercialización son medios para elevar la productividad, reducir los costos de producción, trasladar los beneficios de la investigación y la educación a la comunidad y alcanzar las mejores condiciones de producción y ventas. En el marco institucional existente, con ayuda de Corpoica, las universidades y los organismos internacionales constituyen el camino más adecuado para consolidarlas y perfeccionarlas.

REFORMA AGRARIA

La reforma agraria se fundamentó en la premisa de que las unidades grandes y pequeñas operan con rendimientos similares. Así, el fraccionamiento contribuía a disminuir la concentración y no afectaba la actividad productiva. Los descubrimientos de las últimas dos décadas revelan un comportamiento distinto. Algunas actividades pueden operar con economías de escala en desarrollos extensivos en tierra, agua y grandes inversiones de capital. En este caso, la conciliación de los dos propósitos requiere un tercer elemento, como la presencia del Estado, por ejemplo. La empresa estatal podría preservar la protección para las pequeñas unidades y realizar proyectos en asociación para ampliar la producción y reducir los precios. Como lo demostró Brasil, por este camino el país podría entrar en la producción masiva de cereales y derivados de la ganadería, que son los productos de mayor demanda mundial.



Ciertamente, la explotación de vastas extensiones de tierra sin limitaciones lleva al predominio de los grandes productores, que desplazan las más pequeñas y acentúan la concentración de la propiedad. La eventualidad se evitaría si la realización de los proyectos estuviera a cargo de una empresa estatal o de concesiones a explotaciones especiales destinadas exclusivamente al exterior.

Lo anterior hace reconsiderar la ley Zidres. El proyecto se ha analizado a la luz de la visión teórica de que la productividad de las pequeñas explotaciones es mayor que la de las grandes, hipótesis controvertida por las visiones de economías de escala. No se trata de ninguna manera de abrir el sector para que los medianos productores desplacen a los pequeños en el mercado interno. Lo que se busca es que el gobierno realice, en asociación con los productores, proyectos que exploten las economías de escala y amplíen las oportunidades de producción y empleo para todos los agentes rurales. En la práctica, esto se puede lograr con proyectos liderados por la empresa estatal y concesiones de producción para ciertos cultivos especiales destinados a la exportación.

La reforma agraria no puede ser una estrategia general de aumentos de productividad o de fraccionamiento de tierras sin saber qué significan. El manejo debe efectuarse de manera selectiva, con base en estudios e informaciones de los cultivos, las regiones y las opciones tecnológicas. En términos prácticos, adquiere la forma de programas concretos para elevar la productividad de la tierra mediante procedimientos que permitan controlar los costos y reducir los precios para propiciar su colocación en los mercados nacionales e internacionales, más concretamente en las exportaciones y la sustitución de importaciones. En el fondo, se trata de producir los artículos de mayor demanda mundial en condiciones de productividad y costo similares a los productos temperados.

La principal restricción para la ampliación de la producción agrícola es el incumplimiento de la ley de Say. Debido a la inelasticidad de la demanda, los esfuerzos generales para aumentar la productividad dan lugar a bajas de precios más que proporcionales, y como los productores lo saben bien, no realizan las acciones para hacerla efectiva. De seguro, el aumento de la productividad obtenido en Brasil no habría tenido tal impacto sobre la producción sin la presencia de un Estado que asumiera algunos de los costos de los factores públicos para bajar los precios y aumentar la demanda.

La reforma agraria no puede ser una estrategia general de aumentos de productividad o de fraccionamiento de tierras sin saber qué significan.

El debate sobre el latifundio y la pequeña unidad se plantea dentro de condiciones extremas. En la práctica, no se trata de mantener el latifundio mal explotado, sino de conservar el predominio de las pequeñas explotaciones y realizar proyectos y actividades expuestas a las economías de escala para reducir costos y colocar los productos en el exterior.

La reforma agraria se redujo a normas generales que protegen al pequeño productor. Hoy en día, es evidente que con una mayor presencia del Estado se pueden alcanzar los mismos resultados con más producción, e inserción internacional, lo que le habría dado salida a la agricultura de mayor demanda. La solución es la presencia del Estado en la administración de proyectos concretos. La empresa estatal se encargaría de liderar su realización o entregarlos en concesiones dentro de condiciones claramente establecidas para productos destinados a la exportación.

EMBRAPA

Tal vez la mejor ilustración de la planificación agrícola sea Embrapa, empresa que se concibió como una forma de aumentar las exportaciones y reducir las importaciones. De entrada se reconoce que no hay otra forma de ampliar la demanda. Los resultados son sobresalientes. En un lapso de cuarenta años, la producción del sector creció 3 % y se espera que en los diez años siguientes lo haga al 4 %. Estamos ante el desempeño más sobresaliente del sector en América Latina y en el mundo.

La experiencia de Embrapa muestra cómo, con una estrategia general y el apoyo oficial de la inversión en infraestructura y subsidios, es posible desvirtuar el mito de que los productos de los países con clima temperado no pueden producirse en las mismas condiciones en los países tropicales; el clima domina sobre la

tecnología e incluso sobre las economías de escala. La experiencia brasileña muestra una evidencia contraria. El desempeño sobresaliente del sector obedece a la alta expansión de productos de países de clima temperado. La agricultura en promedio crece 3 % y los cultivos transitorios y la ganadería lo hacen al 5 %. El desarrollo de estas actividades elevó el crecimiento promedio del sector en 1,5 %.

El éxito es el resultado de una estrategia general para el aprovechamiento de las economías de escala. Los productos del ciclo corto se cultivan con mayor productividad en los países de clima temperado por las condiciones biológicas que permiten una fuerte recuperación de las tierras. El efecto se compensó con la siembra en grandes extensiones de tierra, abundancia de agua y elevada capitalización. Pero ¿qué tan extensa debe ser la explotación? En Brasil, el tamaño de las siembras es superior al usual y se logró en zonas como el Cerrado, que se asemejan a los terrenos baldíos de Colombia, en particular en la altillanura. Curiosamente, estamos ante un fenómeno que afecta los productos con nombre propio, como soya, sorgo, maíz y arroz, y los derivados de la ganadería. Su tratamiento puede hacerse dentro del marco de proyectos específicos que la empresa estatal pueda administrar y regular.

Como se muestra en la ecuación de la nota de pie de página 1, las productividades decrecientes de la tierra se pueden compensar con proyectos altamente intensivos en mano de obra, agua y capital. En Brasil, se encuentra que el tamaño debe ser muy superior a las explotaciones convencionales.

CENSO NACIONAL AGROPECUARIO

El Censo Nacional Agropecuario suministra información valiosa sobre el estado del sector. La diversificación productiva se ha reducido, las importaciones representan el 20 % del consumo, la utilización de los consumos productivos es insatisfactoria y la pobreza aumentó. Lo más grave es que no se divisa el panorama para modificar estas condiciones en el futuro. No existe un diagnóstico sobre las causas y soluciones para modificarlas en el futuro.

En general, se observa una gran debilidad en la estructura productiva. Prácticamente, los únicos insumos que se emplean en forma intensa son la mano de obra, los fertilizantes y las semillas. La utilización de

maquinaria y riego, que son los insumos productivos de mayor potencial, ha disminuido y es inferior a los promedios internacionales. Por otra parte, la presencia de la inversión pública es excesivamente baja; apenas representa \$2 billones. Se configuró un círculo vicioso en el cual tanto la participación de la agricultura en el producto como la participación del presupuesto en la agricultura disminuyen.

PRODUCTIVIDAD Y SALARIOS

La información del Censo Nacional Agropecuario revela una realidad distinta de la que se puede apreciar en las observaciones agregadas. La comparación entre los bajos salarios rurales y el bajo ingreso per cápita revela una cuantiosa deformación del sector. Debido a la baja demanda y la baja inversión, así como a la desconexión con el sector urbano acumulada durante décadas, las remuneraciones del sector han sido inferiores a la productividad de la explotación en distintos cultivos. Aún más dicente, en la actualidad el salario agrícola es menos que la mitad del urbano. No es cierto que la productividad del sector en la explotación de tierras sea muy inferior a las urbanas en los servicios. En las cifras



del Censo Nacional Agropecuario se observa que la producción generada por hectárea alcanza 9,6 millones en promedio. Si el productor dispone de cinco hectáreas y se apropia del 70 % de las ventas, su ingreso anual podría ascender a \$10 millones. Si adicionalmente se agregan los subsidios del Estado para elevar la productividad y el ingreso, el productor quedaría en condiciones de obtener una remuneración similar al mínimo urbano. De hecho, significaría la duplicación del ingreso del grupo más pobre de la población y la elevación significativa del ingreso per cápita agrícola.

No es un resultado extraño. La productividad agrícola es altamente flexible y puede conseguirse con inversión y demanda. Sin embargo, la tarea no resulta del mercado y de acciones generalistas. Se requiere una estrategia general que actúe sobre los pequeños, medianos y grandes agricultores.

Los análisis macroeconómicos basados en información del Censo Nacional Agropecuario confirman algunos de los diagnósticos basadas en cifras agregadas. La operación del sector durante varios años con deficiencia de demanda causó serias deformaciones. Los productores carecen de presión para aprovechar las condiciones de la producción. La inelasticidad de la baja demanda da lugar a caídas de precios y salarios que reducen la productividad efectiva y tienen su manifestación más clara en la inversión. Infortunadamente, el comportamiento se interpretó a la luz de la ley de Say y de equilibrio. Durante años se presumió que la baja inversión y la productividad física eran la causa de la reducción de la producción.

Estamos ante un caso extraño, en que las ineficiencias del sector producen serias inequidades. Desde Keynes se intuía que las deficiencias de demanda efectiva estaban relacionadas con la distribución del ingreso. El resultado es de gran importancia teórica e histórica. La deficiencia de demanda efectiva indujo la caída de la producción y el deterioro de la eficiencia, que redujeron los ingresos de los productores rurales, el desplome del sector en el producto y el deterioro de la distribución del ingreso.

La deficiencia de demanda efectiva dio lugar a ineficiencias que se tornan estructurales. Así, las productividades físicas o máximas resultan mayores que las observadas, los precios agrícolas y los salarios. En este sentido, la normalización de la demanda no es suficiente para recuperar la producción, pues debe es-

tar acompañada de políticas de oferta que corrijan las ineficiencias que vienen de atrás, como la baja inversión y la operación óptima de las unidades productivas. La solución se plantea dentro de un marco que contemple las características del sector, más concretamente, que contemplen el tamaño de las exportaciones.

DIAGNÓSTICO

La característica central del sector agrícola es el incumplimiento de la ley de Say en términos estructurales. La oferta potencial es mayor que la demanda. La igualación se ha dado por la baja inversión, el libre mercado y la inelasticidad de los bienes agrícolas. En el periodo 1966-1990, la limitación se superó con un sistema cambiario y comercial orientado a armonizar la promoción de las exportaciones y la sustitución de importaciones. Los aranceles a las importaciones, los subsidios a las exportaciones y las tasas de cambio diferenciales y subvaluadas permitían compensar las diferencias de productividad con respecto a los países desarrollados. Así, se logró entrar en la producción de bienes de mediana complejidad y la producción de cereales. Por otra parte, se mantuvo un elevado nivel de inversión pública y orientación prioritaria del crédito de la agricultura. Sin embargo, se aplicó una fuerte restricción a la inversión en grandes extensiones.

Las condiciones cambiaron con el advenimiento del neoliberalismo. La apertura indujo una especialización en los bienes de ventaja comparativa que carecen de demanda externa. Por otra parte, tuvo lugar el desmonte del Estado y la orientación del crédito hacia otras actividades de mayor retorno especulativo. El resultado fue el agravamiento de los cuellos de botella, en particular de la inversión, y la contracción de demanda que provocaron el desplome del sector. Luego de haber crecido 3,9 % entre 1966 y 1990, pasó al 2,2 % entre 1991 y 2015.

El sector perdió el mercado de los cereales y quedó reducido a las exportaciones tradicionales. Las ventas externas se concentraron en café, banano y flores. Así mismo, se quebró el vínculo entre la economía y el sector. La agricultura no obtiene los beneficios de la expansión económica, en tanto que recibe los costos de la contracción. Además, la reducción del gasto público en la agricultura acentuó las deficiencias del riego y las carreteras de penetración. El desmonte del crédito obligó a los productores a bajar la inversión, por lo que

Se plantea la presencia abierta del Estado con una empresa importante, como Embrapa en Brasil, para llevar a cabo proyectos de grandes dimensiones en asociación con los productores o regularlos dentro de rigurosas concesiones, limitadas a un reducido número de cultivos.

se acentuó la tendencia creciente a la descapitalización. Así las cosas, el sector creció por debajo de la tendencia histórica.

Frente al deterioro del sector, en la administración de Uribe se estableció el Agro Ingreso Seguro (AIS). El programa se orientó a entregar crédito subsidiado a todos los productores, en particular a los de mayor tamaño. Los recursos no llevaron a un aumento de la oferta por falta de demanda. Se desviaron, no tuvieron el efecto propuesto y significaron un gran escándalo público. En parte fue insuficiente para superar la baja inversión pública y la reducida demanda. Los buenos oficios para incrementar la producción inducen a bajas de precios que la desestimulan.

La actual administración, dentro del marco del posconflicto y siguiendo las recomendaciones de la Misión Agrícola para la Transformación del Campo, está comprometida en un aumento significativo del gasto público. Sin embargo, no se sabe cuál será el monto de los recursos presupuestales, de dónde vienen y cómo se orientarán.

La agricultura se concibió sin hacerlo explícito en la ley de Say, que supone que la oferta crea la propia demanda. Se consideraba que los estímulos del mercado para la competencia y el crédito inducían a producir bienes que crean la demanda. Primero, se abrió la economía en la creencia de que la estructura productiva se concentraría en las actividades de ventaja comparativa que generan más ingreso. Luego, se dio rienda suelta al crédito para que los productores invirtieran y prepararan la tierra. Ahora, se busca elevar la inversión pública para contrarrestar la cuantiosa descapitalización de las últimas décadas.

En el pasado, el temor de que los grandes productores desplazaran a los pequeños prácticamente impidió la

capitalización y el desarrollo de actividades con economías de escala. El resultado ha sido una economía dual, con baja inversión y serias limitaciones de demanda.

Todos los esfuerzos se han orientado a ampliar la oferta, pero ahí no está el problema. Las tierras disponibles más que duplican las existentes, y no se manifiestan en la oferta agrícola por las limitaciones de la demanda. En unos productos resultó por la baja de la demanda mundial de los bienes tropicales, con excepción de la palma africana, y en otras por la baja productividad con respecto al exterior. Así, el libre comercio dio lugar a una elevación de la productividad de los bienes de ventaja comparativa que no se hizo efectiva por la escasa demanda por los productos tropicales. Los aumentos de financiación no inducen a incrementar la inversión cuando los productores no creen que existan compradores para sus productos.

La circunstancia de que el limitante de la actividad agrícola haya sido la demanda no quiere decir que no se deba actuar en otros flancos. La limitación de la demanda generó caídas en la inversión y debilitamiento de la estructura productiva que se manifestarían en el momento en que se amplíe la demanda. En ese orden de ideas, el incumplimiento de la ley de Say no implica actuar únicamente en el lado de la demanda sino en los dos frentes.

La estructura agraria es altamente influenciada por el comercio internacional, lo cual es normal en actividades transables. El sector tiende a especializarse en las actividades que pueden elaborarse más fácilmente, como los bienes tropicales; sin embargo, estos cultivos se caracterizan por la baja demanda externa. En este sentido, el libre mercado conduce a estructuras deficitarias, como lo muestra la experiencia de los países mayores de América Latina. Las posibilidades de demanda están restringidas a los cereales y a los productos derivados de la ganadería, que operan con productividades muy inferiores al promedio mundial. Su penetración en los mercados internacionales está condicionada a la aplicación de aranceles y subsidios que están proscritos por la OMC y los TLC. Así las cosas, la optimización de las condiciones de producción puede elevar la productividad y mejorar la inserción internacional, pero el alcance no deja de ser marginal.

Brasil es el país de América Latina que mejor entendió esta realidad. Es bien sabido que los productos del ciclo corto se cultivan a menores costos en los países

temperados por las condiciones biológicas, las cuales permiten una fuerte recuperación de las tierras en invierno. No obstante, en virtud de la notable gestión de Embrapa, la empresa estatal, lograron compensar las desventajas biológicas con las economías de escala que resultan en las siembras en grandes extensiones como el Cerrado, que en muchos aspectos se asemeja a la altillanura colombiana. Durante varias décadas consiguieron que las producciones de maíz, sorgo, soya, trigo y ganadería avanzaran por encima de 5 % y contribuyeran a elevar el crecimiento del sector.

El mayor margen de maniobra del sector está en los cultivos de corto rendimiento y la ganadería, que disponen de mayores posibilidades de expansión. Sin embargo, el camino no está en prescindir de la protección al pequeño productor y darle rienda suelta al productor grande para explotar los terrenos baldíos, como se sugiere en la ley Zidres. Lo que se plantea es la presencia abierta del Estado con una empresa importante, como Embrapa en Brasil, para llevar a cabo proyectos de grandes dimensiones en asociación con los productores o regularlos dentro de rigurosas concesiones limitadas a un reducido número de cultivos.

El esquema descrito en cierta forma puede sustituir la protección del pasado, basada en aranceles y subsidios de exportación. El sector estaría en capacidad de producir y exportar en actividades de alta complejidad tecnológica que disponen de mayor demanda mundial, sin afectar el ingreso de los pequeños productores.

En este contexto, la recuperación del sector requiere un plan estratégico que actúe con la demanda, la inversión y la estructura productiva. Si a ello se agregan los programas de asistencia, coordinación y difusión de información y conocimiento en materia de redes, tecnología y formación de los trabajadores, se darían las bases para el desarrollo dinámico del sector, que contribuiría a reducir la pobreza y mejorar la distribución del ingreso.

En general, se observa que la eficiencia y la equidad evolucionan en dirección contraria. En la agricultura colombiana lo hacen en la misma dirección. La recuperación del sector da lugar a una mejora en la distribución del ingreso. No es algo que pueda lograrse por el mercado o con medidas generalistas. Es indispensable un manejo selectivo, que contemple las características del sector. En la práctica, se puede conseguir creando las condiciones y el apoyo para que los pequeños productores puedan explotar sus unidades en forma eficiente

y obtengan un ingreso similar al salario mínimo urbano, exhortando a los menores productores a que eleven la inversión, accedan al crédito y amplíen los tamaños de las explotaciones, e impulsando una empresa estatal que se iniciaría con la realización de los 250 proyectos de más de mil hectáreas, orientados a aumentar la producción de cereales, ganadería y sus derivados. La propuesta contribuiría a reactivar el sector y reducir la pobreza, pero sería insuficiente en materia de distribución del ingreso. Adicionalmente, se requiere una estructura institucional que propicie una transferencia considerable de los grandes propietarios a los pequeños. Una fórmula sería la normalización de los patrimonios mediante la acción de la DIAN y la aplicación de tarifas progresivas. Si estos recursos se destinan a elevar la inversión pública y a ampliar la participación de la salud, la educación en los estratos 1 y 2 del Sisbén, los avances y la producción, así como el empleo agrícola, irían de la mano de la reducción de las desigualdades.

La agricultura operó durante varias décadas con una deficiencia de demanda efectiva estructural. Los esfuerzos para elevar en forma generalizada la productividad y la inversión resultaron infructuosos. La solución sólo se puede lograr dentro de una estrategia selectiva que amplíe la demanda y la producción, al tiempo que mejore la posición relativa de los campesinos. En la práctica, se requieren acciones orientadas a elevar la productividad y el ingreso de los pequeños productores, aumentar la inversión propia de las unidades medianas y crear una empresa estatal para realizar proyectos de más de mil hectáreas en cereales y ganadería.



ESTRATEGIA SELECTIVA

Las deficiencias de demanda efectiva y la baja inversión han generado un sector ineficiente e inequitativo. Los dos elementos se pueden superar con un cambio drástico en la estructura del sector. En primer lugar, se plantea asegurar la eficiencia de las pequeñas explotaciones y asegurarle al productor agrícola un ingreso similar al salario mínimo urbano. En la práctica se consiguen en la medida que dispongan de amplio suministro de riego y caminos de penetración, adecuado uso de fertilizantes e inversión propia y acceso a la escrituración de la tierra. Más aún, se puede estimular con un subsidio de \$1,9 millones por unidad productiva, \$20 millones de inversión y \$5 millones de titulación, lo que corresponde alrededor de 25 % del ingreso del productor.

Sin embargo, el subsidio se limitaría para las unidades de menos de 20 hectáreas. Las unidades de tamaño medio deben obtener el mismo resultado mediante la elevación de la inversión, el aprovechamiento de las economías de escala y la ampliación de las áreas cultivadas.

El aspecto más novedoso es la explotación de las grandes extensiones. Con base en la inversión por hectárea de Estados Unidos para preparar las tierras destinadas a los cereales y las experiencias de América Latina en materia de riego, se encuentra que la adecuación de mil hectáreas tendría un valor de maquinarias de \$4.000 millones y de riego de \$10.000 millones. En estas condiciones, la gran empresa agrícola podría llevar a cabo 250 proyectos con un costo total de \$3,5 billones, lo que permitiría absorber 37.000 campesinos y generar una fuente indefinida de generación de producción, empleo y visas.

En síntesis, las deficiencias de demanda efectiva e inversión se pueden superar con acciones estructurales guiadas por la eficiencia y la equidad. En primer lugar, es necesario crear las condiciones para que los pequeños productores puedan explotar sus unidades en forma eficiente y obtengan un ingreso similar al salario mínimo urbano. En segundo término, hay que conminar a los medianos productores para que eleven la inversión, accedan al crédito y amplíen los tamaños de las explotaciones. En tercer lugar, la presencia del Estado en proyectos orientados a incrementar la producción de cereales y ganadería y sus derivados, que disponen de la mayor demanda mundial.

CONCLUSIONES

El balance es claro. Las principales limitaciones de la agricultura están en la demanda y en la baja inversión. Los otros aspectos como la aplicación de fertilizantes, redes tecnológicas y comercialización están relativamente bien. La reactivación agrícola requiere una mayor inversión pública en riego y caminos de penetración. Así mismo, es necesario ampliar el acceso de los campesinos a la financiación a largo plazo y otorgar amplios subsidios a la inversión individual dentro de un sistema de preferencias regulado por Corpoica.

El aspecto de la demanda es más grave. En algunos casos la limitación está en la baja demanda de productos tropicales, y en otros casos en los elevados precios de los productos nacionales. Parte de la limitación se podría subsanar con subsidios individuales asignados en la encuesta de preferencia. La otra parte tendría que realizarse mediante un aumento de la productividad de los bienes agrícolas de alta demanda. La práctica se puede materializar con proyectos liderados por una gran empresa agrícola nacional en asociación de productores para aprovechar las economías de escala en la explotación de cultivos claramente identificados, como maíz, sorgo, soya, arroz y derivados de la ganadería. La tarea también se podría hacer con concesiones otorgadas a la explotación de cultivos destinados a la exportación.

La elevación de los ingresos agrícolas se puede lograr mediante transferencias de rentas y la elevación de las productividades. Lo primero se realizaría con subsidios a la oferta, en particular a la inversión pública y privada. Por ese camino no se puede esperar más que un incremento de la participación del gasto público de la agricultura de \$2 billones a \$8 billones. Por otro lado, el aumento de la productividad puede lograrse en forma generalizada y selectiva. Los incrementos generalizados resultan de la inversión y la combinación de insumos, pero en razón de que el sector en su conjunto opera con rendimientos constantes a escala, el impacto no es muy grande. El mayor margen de maniobra está en los productos con mayor capacidad de expansión. Tales son los casos de los cultivos de corto rendimiento y la ganadería y sus derivados. La experiencia brasileña muestra que por ese camino el crecimiento del sector se podría duplicar durante un periodo de varias décadas.

Los productos con economías de escala que se pueden desarrollar en grandes extensiones se reducen al maíz, soya, sorgo, arroz, y ganadería y sus derivados.

Su realización y administración se podrían hacer con una empresa estatal o con concesiones altamente reguladas, por lo menos en lo que respecta a las zonas baldías. La distribución del ingreso requeriría ir más lejos, elevando los gravámenes al patrimonio y orientándolos a los grupos más vulnerables, con transferencias que amplíen el acceso a la salud, la educación y los subsidios a la inversión.

El gran desafío del sector es ampliar la demanda y elevar la inversión. Ambos propósitos se pueden lograr dentro de un manejo selectivo. El primer paso consistiría en crear las condiciones adecuadas para la explotación eficiente de las pequeñas unidades. En principio se requerirá una amplia disponibilidad de riego y caminos de penetración. Adicionalmente, es necesario un subsidio que propicie el uso de fertilizantes y la inversión privada. El segundo, en hacer un esfuerzo propio de las medianas empresas para elevar la inversión, acceder al crédito y ampliar la extensión de los cultivos. El tercero, garantizar la presencia de las grandes empresas del Estado en la realización de 250 proyectos de más de 1.000 hectáreas en cereales y ganadería y sus derivados.

REFERENCIAS

- Barbier, E. & Bugas, J. (2014). Structural change, marginal land and economic development in Latin America and the Caribbean. *Latin America Economic Review*, 23 (3).
- Bustos, P., Caprettini, B. & Ponticelli, J. (2013). Agricultural productivity and structural transformation. Evidence from Brazil. Mimeo.
- Chaves, A. H. (2014). Evolución macroeconómica cuantitativa de la agricultura y transformación estructural, 1976 - 2012. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. Mimeo.
- Deininger, K., Castagnini, R. & González, M. (2004). Comparing land reform and land markets in Colombia: impacts on equity and efficiency. *Policy Research Working Paper Series*, N.º 3258. Banco Mundial.
- Forero, J. (2013). The economy of family production. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, 70 (10).
- Foster, A. & Rosenzweig, M. (2004). Agricultural productivity growth, rural economic diversity, and economic reforms: India, 1970 - 2000. *Economic Development and Cultural Change*, 52 (3).
- Lozano, I. & Restrepo, J. C. (2015). El papel de la infraestructura rural en el desarrollo agrícola en Colombia. *Borradores de Economía*, N.º 904. Banco de la República.
- Misión para la Transformación del Campo (2015). *El campo colombiano: un camino hacia el bienestar y la paz*. DNP.
- Sarmiento, E. (2014). *Distribución del ingreso con crecimiento es posible*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.



Optimización binivel: nuevas perspectivas de aplicación en la planeación y control de operaciones e inventarios

Bilevel optimization: New perspectives in application to operations and inventory planning and control

CARLOS RODRIGO RUIZ CRUZ - WILLIAM JAVIER GUERRERO RUEDA - SONIA ALEXANDRA JAIMES SUÁREZ - ANGÉLICA SARMIENTO LEPESQUEUR

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

carlos.ruiz@escuelaing.edu.co - william.guerrero@escuelaing.edu.co - sonia.jaimes@escuelaing.edu.co - angelica.sarmiento@escuelaing.edu.co

Recibido: 25/10/2015 Aceptado: 23/03/2016

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

Resumen

La optimización binivel consiste en cambiar el paradigma de optimización tradicional, donde un solo agente selecciona su objetivo. Su principal aporte es lograr considerar la interacción que existe entre las decisiones que toman dos tipos de agentes: un líder y un seguidor. En este artículo se exploran posibles campos de aplicación de la optimización binivel, en particular como apoyo a la toma de decisiones en la planeación y control de operaciones e inventarios. Se presenta una visión general de las características de esta técnica y diferentes contextos prácticos en los cuales se ha utilizado. Finalmente, se hace énfasis en la importancia de esta técnica para el desarrollo de investigación aplicada en temas de programación de operaciones, gestión de inventarios y gestión de la cadena de abastecimiento, con nuevas perspectivas para desarrollo de trabajos en este campo.

Palabras claves: optimización binivel, gestión de operaciones, gestión de inventarios.

Abstract

Bilevel optimization consists on reevaluating the paradigm imposed by traditional optimization approaches where a single agent decides the goal to be reached. The main contribution of this new approach is to make a more accurate modelling of the interaction between decisions made by two types of agents: the leader and the follower. In this paper, potential fields of application for bilevel optimization models are discussed, especially those associated to decision-making tools for operations and inventory management. A general overview of this modelling technique is presented and different practical applications are analyzed. Finally, special focus is given to the potential benefits this technique can provide to applied research in fields such as operations scheduling, inventory management, and supply chain management problems.

Keywords: bilevel optimization, operations management, inventory management.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de optimización son un componente integral en el análisis, diseño y mejoramiento de todo tipo de sistemas, desde los sistemas productivos hasta los sistemas sociales y económicos. La mayoría de los problemas de programación matemática tradicionales buscan encontrar la solución óptima desde el punto de vista de un solo decisor, contemplando uno o varios objetivos; por ejemplo, el gerente que debe decidir sobre los niveles de producción que tiene que lograr para maximizar las ganancias de su compañía o el conductor que debe decidir la ruta que tiene que tomar para llegar a otra ciudad en forma más rápida. En estas decisiones existe un solo objetivo o meta (función objetivo), enfocado en maximizar utilidades o minimizar el tiempo del recorrido, además de un solo decisor: el gerente o el conductor.

Métodos como la programación multiobjetivo [1] surgen como una forma de enfrentar aquellos problemas en los cuales se persigue más de una meta en el proceso de toma de decisiones.

En el caso de la alta gerencia se podría buscar, por ejemplo, además de maximizar su utilidad, maximizar la eficiencia de su planta de producción o minimizar el impacto ambiental de sus operaciones, entre otros.

Por otra parte, un conductor de un vehículo puede querer minimizar el tiempo de recorrido y a su vez minimizar el consumo de gasolina o minimizar el pago de peajes. Sin embargo, la programación multiobjetivo no considera las dinámicas que se generan entre los decisores.

Supongamos ahora que en la red de carreteras por la cual se puede desplazar un conductor existe un concesionario encargado de su administración, que obtiene sus ingresos a través de los peajes instalados. Por lo tanto, este concesionario, o decisor, debe establecer dónde ubicar los peajes y las tarifas, de tal manera que saque la mayor utilidad. Sin embargo, sus decisiones afectan la decisión de los conductores, ya que si existen muchos peajes, o sus valores son muy altos, éstos podrían decidir tomar otras rutas, de tal modo que los ingresos en los peajes se verían disminuidos y no se lograrían los ingresos que inicialmente había previsto el administrador de la concesión. En este caso, se puede observar que las determinaciones tomadas por cada decisor afectan al otro.

La característica fundamental de este problema es la relación jerárquica, y posiblemente conflictiva, entre

dos decisores autónomos. Este problema particular se ha estudiado extensamente [2]. Por la naturaleza particular de este tipo de problemas, y la gran cantidad de problemas similares de la vida diaria, aparece la optimización, o programación binivel, como alternativa para hacer una modelación matemática de éstos.

A lo largo de este artículo se pretende presentar una visión general de las características de esta técnica y diferentes contextos prácticos en los cuales se ha utilizado. En la sección siguiente se busca describir la estructura de un modelo de optimización basado en programación binivel, y luego se presenta un resumen de aplicaciones de modelos de programación binivel que se encuentran en la bibliografía científica. Finalmente, se abre un debate en torno al potencial de aplicación de la programación binivel en problemas de planeación y control de operaciones e inventarios, haciendo énfasis en la importancia de esta técnica para el desarrollo de investigación aplicada, con nuevas perspectivas para desarrollo de trabajos en este campo.

MODELOS DE PROGRAMACIÓN BINIVEL

Los problemas de programación binivel (*Bilevel programming problem*, BLPP) se caracterizan por considerar dos niveles jerárquicos de decisión, cada uno de ellos con un punto de vista que puede ser diferente. Las decisiones de cada uno afectan al otro, pero no necesariamente controlan sus acciones [3]. La optimización binivel está relacionada con los conceptos desarrollados por Von Stackelberg [4] en la teoría de juegos. Un BLPP se puede considerar como un juego estático, no cooperativo, con información perfecta entre dos jugadores que buscan optimizar sus beneficios. En el modelo básico, el control de las variables de decisión está dividido entre dos jugadores que buscan optimizar su utilidad individual. Se presume un juego estático, ya que cada jugador tiene un solo movimiento. El líder decide primero y trata de obtener el mejor resultado, considerando de manera anticipada todas las posibles respuestas de su oponente o seguidor. El seguidor observa esta decisión y reacciona en tal forma que logre el mejor beneficio, sin considerar los efectos que esto pueda generar en su oponente. Debido a que el conjunto de opciones factibles para cada jugador es interdependiente, la decisión del líder afecta el resultado del seguidor y sus alternativas, y viceversa. La información perfecta se asume, ya que ambos

jugadores conocen el objetivo y las opciones factibles disponibles para el otro.

Una característica fundamental de los modelos binivel es que el decisor en uno de los niveles puede influenciar el comportamiento del decisor en otro nivel, pero no controlar por completo sus acciones. Adicionalmente, las funciones objetivo de cada nivel pueden, en parte, ser determinadas por variables controladas por otros niveles. Las características fundamentales de un BLPP son [5]:

- Existen unidades de decisión que interactúan dentro de una estructura predominantemente jerárquica.
- Cada nivel ejecuta sus políticas después, y considerando las decisiones de los otros niveles.
- Cada nivel maximiza su beneficio neto (o minimiza sus costos netos) en forma independiente, es decir, no se permite hacer acuerdos entre las partes.
- El efecto del nivel superior en el problema del nivel inferior se refleja en su función objetivo y el conjunto de sus soluciones factibles.

La estructura matemática general de un BLPP es:

$$\begin{aligned} & \min_{x \in X} F(x, y) \\ & \text{s.a.} \\ & G(x, y) \leq 0 \\ & \min_{y \in Y} f(x, y) \\ & \text{s.a.} \\ & g(x, y) \leq 0 \end{aligned}$$

En esta formulación se evidencia la estructura jerárquica del problema, donde el nivel superior tiene control sobre el conjunto de variables $x \in X \subset R^n$ y el nivel inferior tiene control sobre el conjunto de variables $y \in Y \subseteq R^m$. Con una función objetivo del nivel superior, o líder, $F(x, y)$, y una función objetivo del nivel inferior, o seguidor, $f(x, y)$. En el ejemplo, los dos niveles tienen un objetivo de minimización. Sin embargo, éste puede ser de maximización o combinación de los dos criterios. $G(x, y)$ representa el conjunto de restricciones del nivel superior y $g(x, y)$ el conjunto de restricciones del nivel inferior. En el ejemplo, los conjuntos de restricciones se establecen como menor o igual, pero pueden

tomar forma de igualdad ($=$) o de mayor o igual (\geq). Adicionalmente, dependiendo de las formas funcionales de F, f, G y g se tienen diferentes versiones del BLPP.

Se define como *región inducida* al conjunto factible de soluciones del problema. Este conjunto usualmente es no convexo y puede estar desconectado [6]. Jeroslow [7] fue el primero en demostrar que los problemas de BLPP son NP-Hard. Varios enfoques de solución se utilizan para resolver este tipo de problemas, que pueden clasificarse en las siguientes categorías:

- Métodos de enumeración de vértices [8].
- Reformulación utilizando las condiciones de optimalidad de Karush-Kuhn-Tucker [9].
- Enfoques difusos (*Fuzzy approach*) [10].
- Métodos metaheurísticos [11]-[13].

APLICACIONES DE LA PROGRAMACIÓN BINIVEL

La primera definición formal de la programación binivel la hicieron Chandler y Norton [14], como una generalización de la programación matemática. Los autores definieron la estructura matemática general del problema e identificaron las diferencias fundamentales con los métodos de optimización tradicionales con un solo decisor. En igual forma, aplicaron este enfoque a un caso de agricultura en México. En el modelo se consideraba un nivel superior, llamado también nivel de políticas, en el cual los responsables de las políticas económica y agrícola estaban interesados en desarrollar instrumentos que aumentaran el nivel de empleo, los ingresos de los agricultores y los niveles de producción. Para lograr estos objetivos se consideraban restricciones en los subsidios, los precios de compra de los productos agrícolas, el presupuesto disponible y las cargas impositivas. En el nivel inferior, denominado también nivel comportamental, se tomaba en cuenta la decisión de los productores agrícolas para maximizar sus utilidades definiendo los tipos de cultivos que se debían seleccionar, las inversiones en infraestructura y las fuentes de financiamiento, entre otras, considerando restricciones como disponibilidad de tierra, agua, mano de obra, balance de insumos y productos, entre otros factores de la actividad agrícola. Además de los resultados en cuanto a recomendaciones sobre las mejores políticas e instrumentos para estimular la actividad agrícola y la propia operación de estos sectores, los autores destacan

el hecho de que se evidenciaba cómo la descentralización de la economía, sin importar la eficiencia que se pudiera lograr, no lograba satisfacer objetivos sociales por sí sola.

A partir del trabajo de estos pioneros se desarrollaron más modelos en el contexto de la planeación económica en ámbitos regionales o nacionales. En este tipo de problemas el gobierno actúa como líder y controla un conjunto de políticas de fomento o regulación con fines como maximizar el empleo, los ingresos por contribuciones o minimizar el uso de algún recurso, mientras que los sectores económicos actúan en consecuencia a estos instrumentos como seguidores, buscando maximizar sus utilidades, haciendo el mejor uso de su tecnología y recursos disponibles.

Debido a que en diversos contextos se encuentran problemas que cumplen con las características de un BLPP, su empleo se ha extendido a otras áreas del conocimiento diferentes de la económica. A continuación se presentan una revisión de algunos de los campos de aplicación donde se ha usado esta técnica, el enfoque del modelo en relación con los niveles que participan, sus objetivos, el tipo de variables de decisión empleadas y el tipo de método de solución utilizado (figura 1). Para una revisión de la bibliografía enfocada en los métodos de solución de modelos basados en optimización binivel, ver Colson et al. [6].

POTENCIAL DE APLICACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN BINIVEL EN PROBLEMAS DE PLANEACIÓN Y CONTROL DE OPERACIONES E INVENTARIOS

La gestión de operaciones tiene como objetivo general satisfacer las necesidades del cliente al menor costo posible, o mayor utilidad, haciendo el mejor uso posible de los recursos disponibles. Esto se traduce en que las empresas deben ser eficientes y competitivas en diferentes aspectos. La estructura de toma de decisiones para lograr estos objetivos consiste por lo general en tres actividades:

- *Planeación de la producción.* Su objetivo es definir un plan a través del cual se logre balancear la oferta de recursos y demanda de productos, mediante el pronóstico, planeación, maestra, planeación de requerimientos y planeación de la capacidad.
- *Implementación y control.* El objetivo es llevar a cabo los planes propuestos en la planeación de producción. Se realizan dos tareas: la programación y control de las órdenes de producción y la gestión de compras.
- *Gestión de inventarios.* Se busca tener los niveles adecuados para soportar las actividades productivas o la demanda a lo largo del tiempo.

A renglón seguido se presenta la estructura relacional entre estas tres actividades (figura 1):

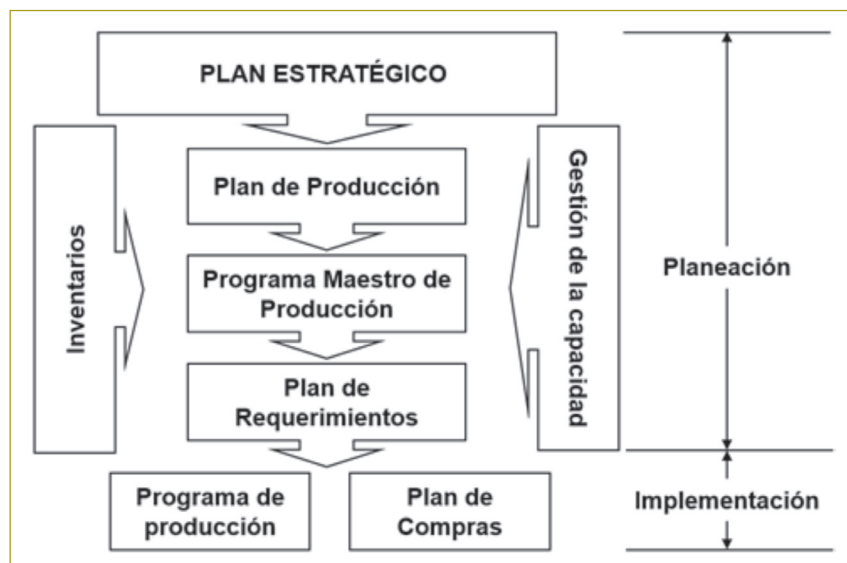


Figura 1. Proceso de toma de decisiones en la planeación y control de operaciones e inventarios. Adaptado de Arnold et al. [34].

Tabla 1
Resumen de algunos campos de aplicación de la optimización binivel

Referencia	Campo de aplicación	Niveles que intervienen en la decisión			Objetivos		Variables de decisión		Método de solución	
		Nivel superior	Nivel inferior	Nivel inferior	Nivel superior	Nivel inferior	Continuas	Discretas	Exacto	Heurístico
[15]	Diseño de políticas económicas	Gobierno	Industria petroquímica	Minimizar los subsidios	Maximizar utilidades	x				x
[16]	Diseño de políticas económicas	Empresa de generación y transmisión de energía eólica	Mercado de energía	Maximizar utilidad	Maximizar el bienestar	x		x		
[17]	Gestión de tráfico	Autoridad de transporte	Usuarios de las vías	Maximizar utilidad de los peajes	Minimizar costos		x	x		
[18]	Gestión de tráfico	Autoridad de transporte	Usuarios de las vías	Maximizar utilidad de los peajes	Minimizar costos		x	x		
[19]	Gestión de tráfico	Autoridad de transporte	Usuarios de las vías	Minimizar las emisiones	Minimizar el tiempo de viaje	x				x
[20]	Gestión de tráfico	Autoridad de transporte	Usuarios de las vías	Minimizar las emisiones	Minimizar el tiempo de viaje	x				x
[21]	Gestión de tráfico	Autoridad de transporte	Usuarios de las vías	Minimizar inversiones	Minimizar costos	x				x
[22]	Gestión de tráfico	Autoridad de transporte	Usuarios de las vías	Minimizar costos	Minimizar costos	x		x		x
[23]	Gestión de tráfico	Autoridad de transporte	Usuarios de las vías	Minimizar costos	Minimizar costos	x				x
[24]	Ingeniería genética	Red metabólica central	Reacciones	Maximizar la producción de compuestos	Maximizar biomasa	x				x
[25]	Ingeniería genética	Red metabólica central	Reacciones	Maximizar la producción de compuestos	Maximizar estabilidad					
[26]	Gestión de ingresos	Distribuidor de fertilizantes	Agricultores	Maximizar utilidad	Minimizar costos	x			x	
[27]	Gestión de ingresos	Aerolínea	Pasajeros	Maximizar ingresos	Minimizar costos	x				x
[28]	Gestión de ingresos	Aerolínea	Pasajeros	Maximizar ingresos	Minimizar costos	x				x
[29]	Ingeniería eléctrica	Pronóstico de carga	Red neuronal	Minimizar el error porcentual medio absoluto (MAPE)	Minimizar la raíz del error cuadrático medio (RMSE)	x				x
[30]	Ingeniería eléctrica	Empresa de generación y transmisión de energía	Mercado de energía	Minimizar inversión	Maximizar el bienestar	x		x		
[31]	Ingeniería eléctrica	Empresa de generación y transmisión de energía	Mercado de energía	Maximizar utilidad	Maximizar el bienestar	x			x	
[32]	Seguridad pública y de instalaciones	Grupo terrorista	Operador del sistema eléctrico	Minimizar el nivel de carga del sistema atacado	Minimizar el nivel de carga no atendida	x				x
[33]	Seguridad pública y de instalaciones	Operador del sistema eléctrico	Grupo terrorista	Maximizar el nivel operativo del sistema	Maximizar el daño	x		x		x

Muchos problemas de toma de decisiones en el campo de la gestión de operaciones e inventarios tienen las características propias de un BLPP, algo natural en el contexto de la planeación de las operaciones y la gestión de la cadena de abastecimiento de una compañía. En éstas existen niveles jerárquicos, representados por la gerencia general y las divisiones o áreas funcionales de la compañía, por ejemplo, producción, finanzas, mercadeo, etc.

La gerencia general puede definir un conjunto de políticas en relación con el uso de los recursos, con lo cual se afectan las estrategias que pueden seguir las áreas funcionales. Por ejemplo, la gerencia puede establecer una política de pago de incentivos por antigüedad del personal en la empresa para reducir la rotación de personal; sin embargo, esta política afectaría las estrategias de producción que se podrían llevar a cabo. En particular, no se podrían utilizar estrategias de persecución de la demanda, que implicarían contrataciones y despidos para poder modificar los niveles de producción; en consecuencia, el plan de producción que se escoja, entre las alternativas diferentes de aquella que ya no se podría llevar a cabo, afectaría las utilidades de la compañía, que la gerencia general tendría como objetivo maximizar.

Esta decisión del nivel óptimo de producción también puede verse afectada por decisiones de precios de venta, que estimulan la demanda; sin embargo, debido a las restricciones que pueden tener los sistemas productivos, tales como capacidad, costos fijos, estacionalidad, costos de alistamiento e inventario, se debe considerar también la combinación de niveles de producción e inventarios que minimicen los costos. De este modo, las decisiones de precios pueden tener efecto en las utilidades y la gestión del sistema productivo y, a su vez, la forma en que se opere el sistema puede afectar las utilidades y el precio al cual es adecuado vender los productos.

Otro ejemplo se observa en las decisiones estratégicas en un sistema productivo, en el que la localización de instalaciones también se puede modelar con esta técnica. El nivel superior decide sobre el conjunto de plantas que hay que abrir y la capacidad de cada una, mientras que el nivel inferior debe establecer la mejor estrategia de producción con el conjunto de plantas abiertas. Gang et al. [35] proponen un modelo de este tipo, para la localización de parques industriales.

En relación con las decisiones tácticas, aquellas enfocadas en la planeación a mediano plazo, se han

propuesto modelos para tomar decisiones jerárquicas. Calvete et al. [36] propusieron un modelo binivel para simultáneamente planear la producción y distribución física, en el cual en el nivel superior se controla la asignación de clientes que hay que atender desde los centros de distribución, las rutas para atenderlos y la cantidad de productos en cada centro de distribución, mientras que en el nivel inferior se decide en qué planta se fabrica cada uno de los productos. Yan et al. [37] y Wang et al. [38] formularon modelos binivel para decidir, en el nivel superior, la configuración óptima de las familias de módulos para entornos de manufactura de ensamble contra pedido, y en el inferior decidir sobre la configuración de la cadena de abastecimiento para su distribución.

En el ámbito de las decisiones operativas, un problema de particular interés en la gestión de operaciones e inventarios es el de programación de producción. Los problemas en este campo consisten en asignar recursos a lo largo del tiempo para desarrollar el conjunto de tareas necesarias para completar una orden de producción [39].

La complejidad de la programación de producción se evidencia en varios aspectos: primero reside en la naturaleza de los recursos que pueden estar involucrados, como máquinas, mano de obra, dinero, energía, herramientas, espacio, etc. Segundo, en las características propias de las órdenes, ya que éstas pueden tener fechas de entrega, tiempos de disponibilidad, diferente importancia, necesidades de alistamiento, etc. Tercero, en las características del sistema productivo, puesto que la naturaleza de los sistemas productivos depende de la característica de sus procesos y los flujos que se dan a través de ellos; por ejemplo, un sistema de producción en línea, en el cual todas las órdenes de producción siguen la misma secuencia de operaciones, representa un problema diferente de un sistema de producción tipo taller, en el cual las órdenes tienen secuencias de producción distintas.

Por último, los indicadores de desempeño pueden ser variados, dependiendo de la estrategia competitiva y de operaciones de la empresa; una compañía que produzca por pedido generalmente está interesada en que se cumpla a cabalidad la fecha pactada de entrega al cliente, pero en una empresa que produzca contra inventario, en masa, este objetivo no es el más relevante, primero porque produce antes de que sus clientes le hayan pedido y segundo porque sus prioridades están en lograr

la mayor eficiencia en costos, por lo cual su desempeño se mide fundamentalmente en estos términos.

Dado todo lo anterior, proponer soluciones en esta materia se convierte en una tarea compleja que, dependiendo de las características del problema analizado, requiere técnicas como la programación entera mixta o el uso de reglas de despacho, heurísticas o metaheurísticas. Sin embargo, explorar nuevas técnicas de optimización que puedan soportar las decisiones complejas en programación de producción se convierte en un campo de interés no sólo en el ámbito académico sino también en el industrial.

Por otra parte, en cuanto a los problemas de inventarios, las decisiones básicas que se deben tomar son cuándo y cuánto pedir de los artículos que se utilizan en el sistema productivo o que se suministran a los clientes. A través de las decisiones que se tomen se deben lograr en forma simultánea dos objetivos. El primero es que las cantidades que se mantienen en inventario deben servir para satisfacer las necesidades del sistema productivo o de los clientes, y el segundo es que los costos que generan estas decisiones deben ser lo más bajos posible. La estructura de niveles en este tipo de problemas puede ser de dos tipos:

- *Interacción entre eslabones de una cadena de abastecimiento.* Existen productores y compradores que interactúan en una estructura predominantemente jerárquica y que buscan, de manera independiente, minimizar sus costos.
- *Interacción entre unidades de una compañía.* Para el área de operaciones su objetivo fundamental es maximizar la eficiencia del sistema, generalmente a través de la mayor utilización, y menores costos, del sistema productivo. Esto se puede traducir en mayores niveles de inventarios debido a que se pueden producir, o pedir, lotes más grandes, lo que aumenta los costos asociados al almacenamiento. El área de mercadeo busca satisfacer la mayor cantidad de demanda posible, que como consecuencia puede traer aumentos en los costos de almacenamiento debido a la necesidad de incrementar los niveles de inventario para que los niveles de servicio sean mayores. Por su parte, el área financiera preferiría inventarios más bajos, ya que éstos generan costos a las compañías debido al costo de oportunidad del dinero invertido en ellos, así como que por tratarse de un activo hay que pagar impuestos.

Estos objetivos diversos de las áreas funcionales en relación con los niveles adecuados de inventarios de una misma organización permiten que el uso de nuevas técnicas de optimización sean apropiadas para hacer frente a la toma de decisiones en este tipo de problemas, más aún cuando la mayoría de las técnicas tradicionales empleadas en este tipo de situaciones apuntan al uso de un solo objetivo, partiendo del supuesto de que el cumplimiento de éste lleva al mejor escenario de todos los actores involucrados en el problema.

Entre las nuevas técnicas utilizadas en problemas como los descritos en párrafos anteriores se encuentra la optimización binivel. El uso de la optimización binivel ha sido relativamente poco para modelar problemas de gestión de operaciones e inventarios. Los modelos de optimización que tradicionalmente se han empleado son monoobjetivo o multiobjetivo, y enfocados en encontrar una solución óptima para un solo tomador de decisiones. Sin embargo, muchos problemas de programación tienen una estructura jerárquica de decisión, en la cual cada nivel puede tener diferentes objetivos y, en algunos casos, conflictivos. Por ejemplo, querer entregar a tiempo las órdenes generalmente está en conflicto con el uso eficiente de la planta o los equipos.

Los desarrollos en este campo han sido pocos [40]. Karlof y Wang [41] desarrollan un modelo para un sistema *flowsheet* en el cual el jefe del taller, nivel superior, decide la asignación de operarios a un conjunto de máquinas, con el objetivo de minimizar el tiempo total de flujo en razón de que la remuneración se hace con base en este indicador, mientras que el nivel inferior, asociado al cliente, desea minimizar el *makespan* debido a que interesa que los trabajos se terminen lo antes posible y su decisión consiste en establecer la mejor secuencia de procesamiento. Lukac et al. [42] aplican BLPP a un sistema compuesto de dos máquinas, con tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia. En el nivel superior se pretende minimizar el tiempo total de alistamiento y en el nivel inferior minimizar los costos asociados a la producción, almacenamiento y alistamiento de las máquinas. Kis y Kovacs [40] proponen un conjunto de potenciales aplicaciones del BLPP en la programación de producción para configuraciones de una máquina y máquinas paralelas, para los cuales proponen dos categorías de clasificación de los problemas. La primera para aquellos en los cuales las funciones objetivo de los niveles son del mismo tipo, por

ejemplo, minimizar el tiempo total de terminación. La segunda con funciones objetivo diferentes, por ejemplo, minimizar el *makespan* en un nivel y minimizar el número de trabajos tardíos en el otro. Kasemset y Kachitvichyanukul [43] propusieron un modelo de programación de un *jobshop* usando conceptos de la teoría de restricciones (TOC), donde en el nivel superior se busca minimizar el tiempo ocioso del cuello de botella mientras que en el nivel inferior se busca minimizar, en forma ponderada, el *makespan*, la tardanza máxima y el adelanto máximo.

A diferencia de la planeación de operaciones, el empleo de BLPP se encuentra en un estado un poco más desarrollado para el tipo de problemas en los cuales existe una relación jerárquica entre eslabones de una cadena de abastecimiento, donde los problemas analizados tienen implícitos varios actores con objetivos diferentes, pero con acceso a los mismos recursos para el cumplimiento de sus objetivos.

Los modelos que se han desarrollado a la fecha, en BLPP, son de dos eslabones, dejando campo al estudio de modelos multinivel que sean aplicables a cadenas de abastecimiento de múltiples eslabones. Se destacan los trabajos de Chang et al. [44], quienes abordan el problema del vendedor de periódicos [45] en un sistema de dos eslabones, con objetivos relacionados con la maximización del beneficio para el productor y minimizar el valor en riesgo condicional (CVaR [46]) para el detallista. Abdelaziz y Mejri [47] analizan el caso de una compañía con un centro de distribución que soporta dos cadenas, con objetivos relacionados con la minimización de costos de inventario y de operación del centro de distribución. Yao y Xu [48] desarrollan un modelo binivel para simultáneamente minimizar los costos esperados, asociados al inventario de un productor y maximizar la utilidad esperada del comprador en una cadena de suministro con múltiples artículos. Zegordi y Mokhlesian [49] desarrollaron un modelo para definir los niveles de inventario en una cadena de abastecimiento de artículos perecederos, considerando la coordinación entre productor y detallista a través de una estrategia de inversión en publicidad. Sin embargo, no se han explorado aplicaciones de modelos binivel para resolver problemas de toma de decisiones relacionadas con inventarios en los cuales se coordinan unidades de una misma compañía.

Como se ha mostrado, el potencial de aplicación de BLPP en estas áreas es muy amplio. Esto abre un vasto

campo para el estudio, no sólo para investigadores en el campo de gestión de operaciones e inventarios, sino también en diversas áreas de la ingeniería industrial y otros campos del conocimiento. Adicionalmente, se ha mostrado la importancia de desarrollar investigación aplicada en esta técnica en procura de desarrollar herramientas de toma de decisiones, específicamente en las áreas de programación de operaciones, gestión de inventarios y gestión de la cadena de abastecimiento.

- Esta técnica ofrece, en particular, oportunidades de investigación en temas como planeación de producción y programación de órdenes simultánea.
- Planeación maestra de producción (MPS), considerando decisiones de requerimientos de materiales (MRP).
- Decisiones de gestión de inventarios, considerando decisiones financieras y de mercadeo.

REFERENCIAS

- [1] T. W. Ruefli, "A Generalized Goal Decomposition Model," *Manage. Sci.*, vol. 17, N.º 8, p. B505-B518, Apr. 1971.
- [2] N. I. Kalashnykova, V. V. Kalashnikov, and R. C. H. Maldonado, "Bilevel Toll Optimization Problems: A Heuristic Algorithm Based Upon Sensitivity Analysis," Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 135-143.
- [3] W. F. Bialas and M. H. Karwan, "Two-level linear programming," *Manage. Sci.*, vol. 30, N.º 8, pp. 1004-1020, 1984.
- [4] H. Von Stackelberg, *The theory of the market economy*. Oxford University Press, 1952.
- [5] J. F. Bard, *Practical bilevel optimization: algorithms and applications*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [6] B. Colson, P. Marcotte, and G. Savard, "An overview of bilevel optimization," *Ann. Oper. Res.*, vol. 153, N.º 1, pp. 235-256, Apr. 2007.
- [7] R. G. Jeroslow, "The polynomial hierarchy and a simple model for competitive analysis," *Math. Program.*, vol. 32, N.º 2, pp. 146-164, Jun. 1985.
- [8] J. Bard and J. Moore, "A branch and bound algorithm for the bilevel programming problem," *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, 1990.
- [9] S. Dempe and A. B. Zemkoho, "On the Karush-Kuhn-Tucker reformulation of the bilevel optimization problem," *Nonlinear Anal. Theory, Methods Appl.*, vol. 75, N.º 3, pp. 1202-1218, Feb. 2012.
- [10] M. Sakawa, I. Nishizaki, and Y. Uemura, "Interactive fuzzy programming for multilevel linear programming problems," *Comput. Math. with Appl.*, vol. 36, N.º 2, pp. 71-86, Jul. 1998.
- [11] M. Gendreau, P. Marcotte, and G. Savard, "A hybrid Tabu-ascend algorithm for the linear Bilevel Programming Problem," *J. Glob. Optim.*, vol. 8, N.º 3, pp. 217-233, Apr. 1996.
- [12] S. Hejazi and A. Memariani, "Linear bilevel programming solution by genetic algorithm," *Comput. Oper. ...*, 2002.
- [13] K. Sahin and A. Ciric, "A dual temperature simulated annealing approach for solving bilevel programming problems," *Comput. Chem. Eng.*, 1998.

- [14] W. Norton, R. Candler, "Multi-level programming and development policy," pp. 1-56, May 1977.
- [15] J. F. Bard, J. Plummer, and J. Claude Sourie, "A bilevel programming approach to determining tax credits for biofuel production," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 120, N.º 1, pp. 30-46, Jan. 2000.
- [16] L. Baringo and A. J. Conejo, "Wind power investment within a market environment," *Appl. Energy*, vol. 88, N.º 9, pp. 3239-3247, Sep. 2011.
- [17] M. Labbé, P. Marcotte, and G. Savard, "A Bilevel Model of Taxation and Its Application to Optimal Highway Pricing," *Manage. Sci.*, Dec. 1998.
- [18] V. V. Kalashnikov, N. I. Kalashnykova, and R. C. Herrera-Maldonado, "Solving the toll optimization problem by a heuristic algorithm based upon sensitivity analysis," in *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2014, pp. 682-686.
- [19] Y. Yin and S. Lawphongpanich, "Internalizing emission externality on road networks," *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 11, N.º 4, pp. 292-301, Jul. 2006.
- [20] S. Sharma and T. V. Matthew, "Transportation Network Design with Emission Pricing as a Bilevel Optimization Problem," in *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, 2007.
- [21] S. Sharma and T. V. Mathew, "Multiobjective network design for emission and travel-time trade-off for a sustainable large urban transportation network," *Environ. Plan. B Plan. Des.*, vol. 38, N.º 3, pp. 520-538, Jun. 2011.
- [22] H. Zhang and Z. Gao, "Bilevel programming model and solution method for mixed transportation network design problem," *J. Syst. Sci. Complex.*, vol. 22, N.º 3, pp. 446-459, Jul. 2009.
- [23] S.-W. Chiou, "Bilevel programming for the continuous transport network design problem," *Transp. Res. Part B Methodol.*, vol. 39, N.º 4, pp. 361-383, May 2005.
- [24] P. Pharkya, A. P. Burgard, and C. D. Maranas, "Exploring the overproduction of amino acids using the bilevel optimization framework OptKnock," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 84, N.º 7, pp. 887-899, Dec. 2003.
- [25] Y. Chang and N. Sahinidis, "Optimization of metabolic pathways under stability considerations," *Comput. Chem. Eng.*, 2005.
- [26] J. Fortuny-Amat and B. McCarl, "A Representation and Economic Interpretation of a Two-Level Programming Problem," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 32, N.º 9, pp. 783-792, 1981.
- [27] J.-P. Côté, P. Marcotte, and G. Savard, "A bilevel modelling approach to pricing and fare optimisation in the airline industry," *J. Revenue Pricing Manag.*, vol. 2, N.º 1, pp. 23-36, Apr. 2003.
- [28] P. Marcotte, G. Savard, and D. Zhu, "Mathematical structure of a bilevel strategic pricing model," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 193, N.º 2, pp. 552-566, Mar. 2009.
- [29] J. A. Keane, "Short-Term and Midterm Load Forecasting Using a Bilevel Optimization Model," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, N.º 2, pp. 1080-1090, May 2009.
- [30] L. P. Garcés, A. J. Conejo, R. García-Bertrand, and R. Romero, "A Bilevel Approach to Transmission Expansion Planning Within a Market Environment," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, N.º 3, pp. 1513-1522, Aug. 2009.
- [31] C. Ruiz and A. J. Conejo, "Pool Strategy of a Producer With Endogenous Formation of Locational Marginal Prices," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, N.º 4, pp. 1855-1866, Nov. 2009.
- [32] J. Arroyo and F. Galiana, "On the solution of the bilevel programming formulation of the terrorist threat problem," *Power Syst. IEEE Trans.*, 2005.
- [33] N. Romero, N. Xu, L. K. Nozick, I. Dobson, and D. Jones, "Investment Planning for Electric Power Systems Under Terrorist Threat," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, N.º 1, pp. 108-116, Feb. 2012.
- [34] J. R. T. Arnold, S. N. Chapman, and L. M. Clive, *Introduction to Materials Management*, 2007.
- [35] J. Gang, Y. Tu, B. Lev, J. Xu, W. Shen, and L. Yao, "A multi-objective bi-level location planning problem for stone industrial parks," *Comput. Oper. Res.*, vol. 56, pp. 8-21, Apr. 2015.
- [36] H. I. Calvete, C. Galé, and M.-J. Oliveros, "Bilevel model for production-distribution planning solved by using ant colony optimization," *Comput. Oper. Res.*, vol. 38, N.º 1, pp. 320-327, 2011.
- [37] D. Yang, J. (Roger) Jiao, Y. Ji, G. Du, P. Helo, and A. Valente, "Joint optimization for coordinated configuration of product families and supply chains by a leader-follower Stackelberg game," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 246, N.º 1, pp. 263-280, 2015.
- [38] D. Wang, G. Du, R. J. Jiao, R. Wu, J. Yu, and D. Yang, "A Stackelberg game theoretic model for optimizing product family architecting with supply chain consideration," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 172, pp. 1-18, 2016.
- [39] M. L. Pinedo, *Planning and scheduling in manufacturing and services: Second edition*, 2009.
- [40] T. Kis and A. Kovács, "On bilevel machine scheduling problems," *OR Spectr.*, vol. 34, N.º 1, pp. 43-68, 2012.
- [41] J. K. Karlof and W. Wang, "Bilevel programming applied to the flow shop scheduling problem," *Comput. Oper. Res.*, vol. 23, N.º 5, pp. 443-451, 1996.
- [42] Z. Lukač, K. Šorić, and V. V. Rosenzweig, "Production planning problem with sequence dependent setups as a bilevel programming problem," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 187, N.º 3, pp. 1504-1512, 2008.
- [43] C. Kasemset and V. Kachitvichyanukul, "A PSO-based procedure for a bi-level multi-objective TOC-based job-shop scheduling problem," *Int. J. Oper. Res.*, 2012.
- [44] L. Cheng, Z. Wan, and G. Wang, "Bilevel newsvendor models considering retailer with CVaR objective," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 57, N.º 1, pp. 310-318, Aug. 2009.
- [45] T. M. Whitin, "Inventory Control and Price Theory," *Manage. Sci.*, vol. 2, N.º 1, pp. 61-68, Oct. 1955.
- [46] L. Arbelaez and L. Ceballos, "El valor en riesgo condicional CVaR como medida coherente de riesgo," *Rev. Ing.*, 2005.
- [47] F. Ben Abdelaziz and S. Mejri, "Decentralised bilevel model for shared inventory management," *Prod. Plan. Control*, vol. 24, N.º 8-9, pp. 684-701, Sep. 2013.
- [48] L. Yao and J. Xu, "A class of expected value bilevel programming problems with random coefficients based on rough approximation and its application to a production-inventory system," *Abstr. Appl. Anal.*, 2013.
- [49] S. H. Zegordi and M. Mokhlesian, "Coordination of pricing and cooperative advertising for perishable products in a two-echelon supply chain: A bi-level programming approach," *J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 8, N.º 4, pp. 39-60, Sep. 2015.

La cualidad de desviar en uno: la unidad desde la diferencia

The attribute of deviating inside:
building unity from differences

FELIPE RODRÍGUEZ GÓMEZ

Maestro en Arte de la Universidad de los Andes. Master of Fine Arts, School of the Art Institute of Chicago.
Profesor instructor del Departamento de Humanidades de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

felipe.rodriguez@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/01/2016 Aceptado: 27/03/2016

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

Resumen

En este artículo se presentan varias consideraciones sobre la educación que se imparte en las universidades en Colombia. Se plantea la necesidad de la construcción de un sistema educativo coherente con los retos planteados por la sociedad actual; invita a pensar en una educación incluyente en la que el contexto colombiano y su diversidad, hacen del medio universitario un espacio que posibilite la resolución de conflictos. Se plantea una reflexión sobre si es adecuado el tiempo que invierte un estudiante en su trabajo académico.

Palabras claves: educación, contexto, universidad, diversidad, tiempo, educación integral.

Abstract

This article shows several considerations to be taken into account regarding education in Colombian universities. It is necessary to create an educational system that is coherent with the challenges that today's society demands; it encourages to think about an inclusive education in which the Colombian context and its diversity make universities spaces that promotes conflict solving. A reflection is made in terms of how adequate the time that students invest in their academic work is.

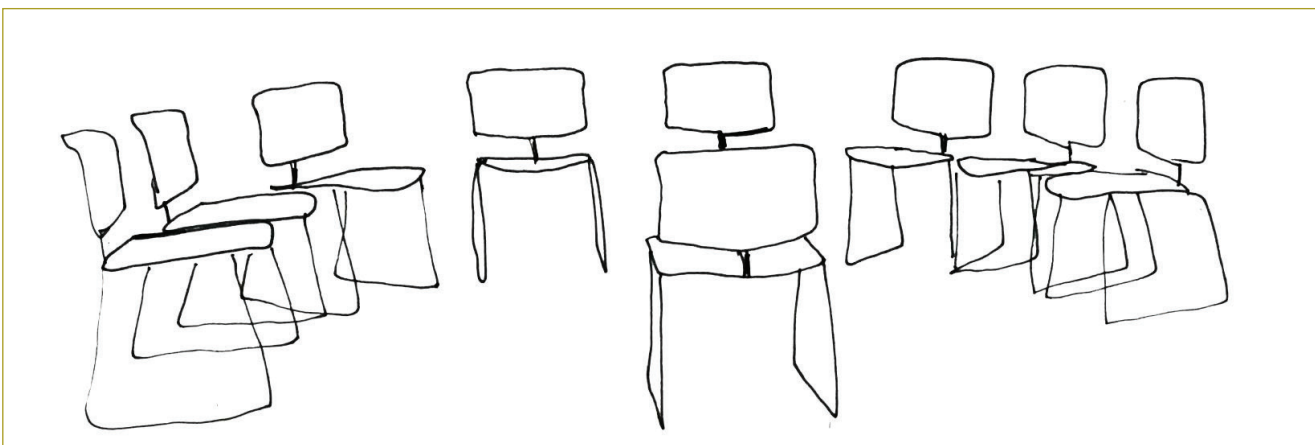
Keywords: education, context, university, diversity, time, comprehensive education.

Que un estudiante universitario tenga acceso a ramas del conocimiento exteriores a su enfoque disciplinar parece que está implícito en el modelo educativo actual. Un estudiante de una disciplina específica tiene acceso a otras a través de cursos obligatorios de otros enfoques disciplinares y cursos de libre elección. Teniendo en cuenta tales consideraciones, la mayoría de los estudiantes parecen entender estos cursos incluidos en los planes de estudios, o como requisitos (obligaciones curriculares) de sus programas educativos o como formas paralelas y ajenas a su carrera. En ningún momento se implementa (en la práctica) la construcción de un sistema integral de educación que le permita al estudiante tener continuidad con estos procesos y conocimientos. El modelo actual de educación (cuya finalidad principal, al término de los estudios, es conseguir un empleo, es decir, la búsqueda de una remuneración monetaria), fomenta la competencia, el individualismo y carece de un sustento social o de comunidad. Sus valores se presentan dentro de una estructura omnisciente que, más allá de afirmarse como incuestionable, se arraiga dentro de los seres humanos como absoluta, evitando cuestionamientos y, por ende, el diálogo, impulsando la homogeneización de los individuos y la estigmatización de la diferencia. Este modelo contradice, desde la práctica, su propio postulado de educación integral.

Sería bueno analizar si es importante considerar la totalidad del territorio colombiano a la hora de pensar en educación (¿integral?), donde los contenidos pedagógicos reconozcan la diversidad cultural y de contexto de los estudiantes. Infortunadamente, hoy en día la educación superior está desplazando de sus regiones de

origen a los pocos interesados que pueden pagar estudios universitarios o acceder a becas, hacia las contadas ciudades que albergan universidades certificadas de alta calidad, de acuerdo con la denominación del Ministerio de Educación, situación que sugiere una concentración del trabajo (si tomamos en cuenta una educación que desconoce el territorio al no poder abarcarlo en su totalidad), impidiendo en la mayoría de los casos que los estudiantes vuelvan a sus lugares de origen para poner en práctica sus conocimientos. Es fundamental que lo que se define como educación empiece a reconciliar no sólo diferentes conocimientos y formas de pensamiento, sino también los contextos y posibilidades del territorio nacional para permitir a los estudiantes vínculos con sus tradiciones y problemas locales, fortaleciendo los conocimientos tácitos que sus sitios de origen les han proporcionado.

Utilizada como concepto, la palabra *contexto* puede transformarse en una mera muletilla. ¿Qué significa en realidad considerar el entorno en el que se desarrolla un estudiante o de dónde proviene? La tarea parece estar fuera de alcance en nuestro caso, pues abarca un vasto territorio desarticulado por una serie de problemas sociales, económicos y políticos que convergen dentro de la mirada sesgada de los medios de comunicación. Muy lejos de esta visión se encuentra la posibilidad de la mayoría de nosotros de acercarnos a la realidad de nuestro territorio. Pero, a pesar de esta dificultad, es posible una aproximación al país si se entiende la universidad como un punto de encuentro (de diferentes territorios) y no como un mecanismo homogeneizador de visiones, pensamientos y metodologías.



Dibujo del autor.

Al entender la educación como un acto meramente relacional, donde dos o más individuos se encuentran y ponen en juego sus conocimientos (es decir, los lugares donde han vivido y aprendido) la universidad puede entenderse como un punto de correspondencia para la resolución de conflictos. Es tal vez un lugar de experimentación para la convergencia de más de un contexto alrededor de un mismo problema. Es decir, que ante la impotencia que genera la imposibilidad de abarcar todo nuestro territorio, la universidad se puede transformar en un espacio de tránsito, de encuentro y, por tanto, en un espacio de intercambio. La idea de intercambio plantea voluntad y reciprocidad (en Colombia, la voluntad está restringida por el deseo impuesto, por imaginarios que se tienen sobre la importancia de ir a la universidad), al igual que una búsqueda de metodologías de encuentro, las cuales parten desde el lenguaje y la capacidad de los profesores para construir plataformas de comunicación y expresión. Un espacio para escuchar y ser escuchado, un espacio horizontal.

Los mecanismos de evaluación actuales proponen otro espacio (un espacio vertical), mostrando al otro (al que idealmente deberíamos experimentar como *compañero*) como un posible rival. Si partimos de esta idea de competir (establecida), se limitan las posibilidades del grupo, ya que competir y colaborar no van de la mano; se genera, entonces, un déficit en las capacidades para comunicarse, expresarse y relacionarse de los individuos que forman parte de este modelo educativo.

La contradicción que se plantea en un sistema individualista de educación, en el que existen algunas manifestaciones o metodologías grupales, puede ayudarnos a entender el individualismo que se ve reflejado a nivel social y sus paradojas en la vida diaria (aislamiento social, radicalización de grupos, discriminación, intolerancia, etc.). La inhabilidad para comunicarnos impuesta por el sistema educativo actual deviene de la falta de empatía por el otro, que cada vez experimentamos con mayor frecuencia.

Un ejemplo que permite entender las contradicciones que resultan de las metodologías *horizontales*, *grupales* y de *colaboración* dentro de sistemas educativos *verticales*, *individuales* y de *competencia*, es lo que sucede cuando en trabajos asignados para que los estudiantes los realicen en grupo, uno de los individuos decide realizar todo el trabajo. No importa que los demás integrantes del grupo, sin trabajar, se den crédito; la condición importante

es que no tengan que reunirse para desarrollar el trabajo asignado. Uno de los detonantes de esta actitud, cada vez más común, es la relación entre créditos académicos (horas de trabajo del estudiante para atender sus obligaciones académicas) y el tiempo libre. Si miramos en la siguiente tabla obtenida de una encuesta a 80 estudiantes, se puede concluir que para un promedio ponderado de 18 créditos académicos cursados, que equivalen a 54 horas de trabajo a la semana de acuerdo con la definición de crédito académico (14 horas más que el tiempo promedio de un trabajo remunerado), a los que se suman las horas de movilidad, alimentación, aseo y sueño, resultan valores de trabajo académico altos e incongruentes para el desempeño adecuado de un estudiante, así:

18 créditos:	54 horas de estudio a la semana.
8 horas de sueño:	56 horas de sueño a la semana.
3 horas diarias de movilidad:	15 horas de movilidad a la semana.
1 hora de aseo:	7 horas a la semana.
2 horas diarias de comida:	25 horas a la semana.
Tiempo total para el trabajo académico:	157 horas a la semana.
Tiempo libre a la semana:	11 horas.
Tiempo libre diario por semana:	1,57 horas.

(En la encuesta también se obtuvo que al semestre el 80 % de los estudiantes toman 18 créditos o más, 75 % de los estudiantes duermen menos de 8 horas diarias, el 77 % de los estudiantes emplean más de 2 horas diarias en su movilización, 95 % de los estudiantes emplean 2 horas diarias o más para alimentarse, el 100 % de los estudiantes emplean más de 1 hora diaria en su aseo personal, 65 % de los estudiantes tiene disponible para el ocio menos de 5 horas a la semana, tal como se observa en las siguientes gráficas):

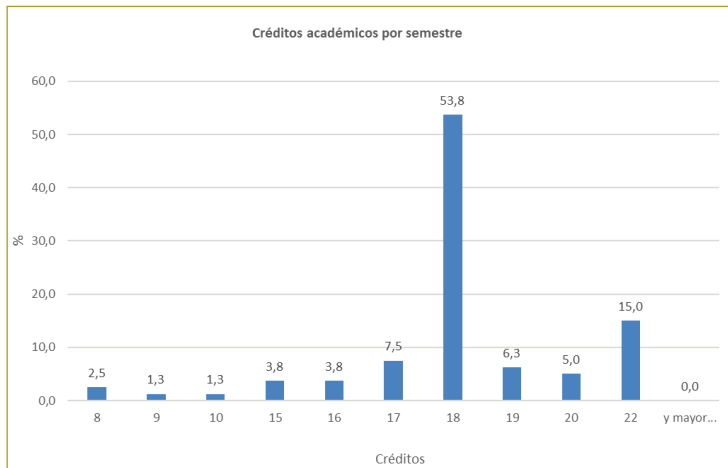


Figura 1. Porcentaje de estudiantes vs. créditos académicos por semestre. Encuesta a 80 estudiantes.

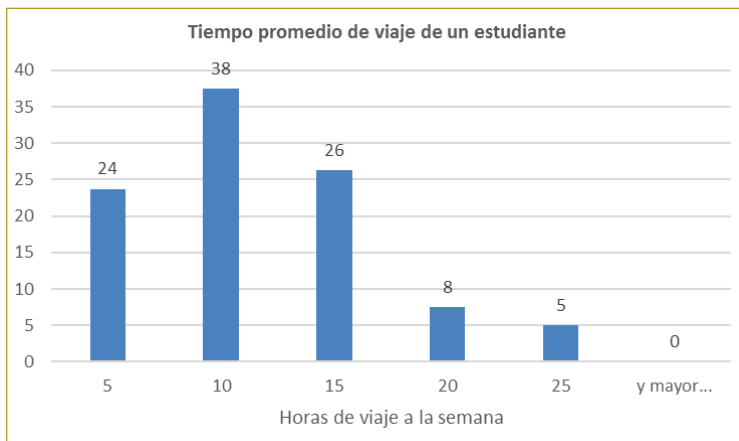


Figura 2. Porcentaje de estudiantes vs. tiempo promedio de viaje a la semana.

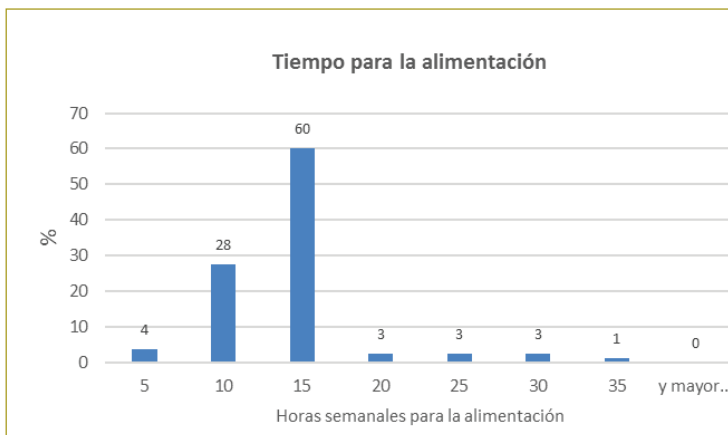


Figura 3. Porcentaje de estudiantes vs. tiempo dedicado a la alimentación.

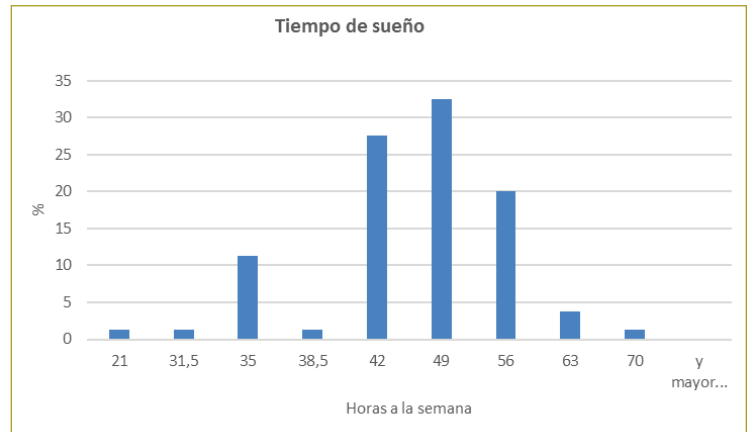


Figura 4. Porcentaje de estudiantes vs. tiempo dedicado al sueño.

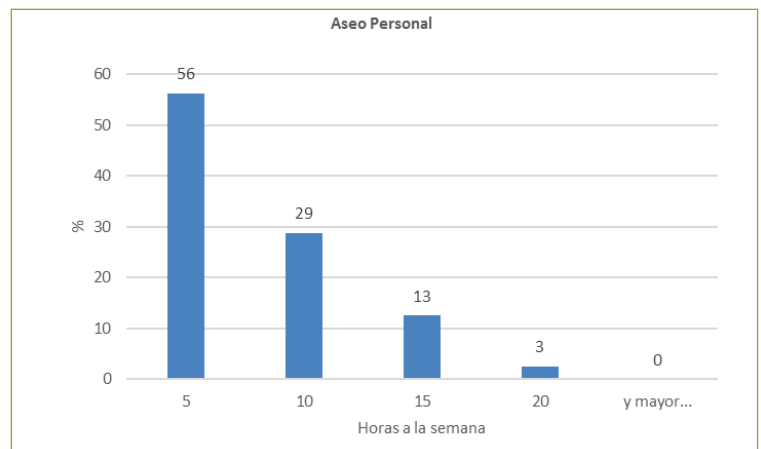


Figura 5. Porcentaje de estudiantes vs. tiempo semanal dedicado al aseo personal.

El modelo actual muestra un decrecimiento en el interés por el aprendizaje y el conocimiento en los últimos meses del semestre, en los que la acumulación de carga académica, sumada a la necesidad de la nota, hace que el estudiante se vea forzado a superar las asignaturas a cualquier costo.

En 2015, en una de mis clases, tuve la oportunidad de conversar con mis estudiantes sobre sus promedios globales en la universidad y lo que opinaban sobre el valor obtenido. Frente a la escasez de promedios altos en este grupo de estudiantes, me aventuré a preguntar a uno de los pocos que mantenían un promedio por encima de 3,7 (2 entre 25) como hacía para lograr esta hazaña, a lo que respondió:

“Desde que entré a estudiar tengo una beca. El primer semestre fue el que más he disfrutado, yo no le

tenía miedo a nada y aprendí más que en cualquier otro semestre. Desafortunadamente, esto no se vio reflejado en mis calificaciones y me llegó una carta en la que me comunicaban que si no subía mis notas perdería la beca en el semestre siguiente. Desde ahí me he enfocado en la nota y me va muy bien, pero siento que no he aprendido tanto como en mi primer semestre, pero obtengo una buena nota, que es lo importante; estudio para pasar los exámenes. Responder lo que los exámenes requieren no es complicado, pero ocupa todo mi tiempo, el familiar, el de los amigos, para poder seguir estudiando”.

En este caso, podemos ver cómo las imposiciones transforman un interés por el conocimiento en una necesidad por cumplir. Se puede pensar en el modelo educativo actual como un modelo que se interesa por el *qué* y no por el *cómo*.

Volviendo a las metodologías grupales y su falta de articulación si se piensa en la idea de calificar y de la nota, se observa que ésta es un *qué* y no un *cómo*; el valor de lo grupal es el proceso, algo líquido; la nota es un resultado, algo sólido. De esta manera, podemos asociar el proceso con el contexto y la nota con algo abstracto, un deseo de legitimidad, un aval para continuar, un título.

El interés frente al *cómo* o la importancia del proceso en el aprendizaje no se debería abarcar únicamente desde lo teórico, en mayor medida se debería abordar desde el hacer, desde el proceso, desde el lugar. El desconocimiento del contexto o el desinterés frente a éste se evidencia en la desarticulación entre la sociedad y la academia. Los planteamientos teóricos, éticos y morales discutidos en la academia no reflejan lo que sucede en la realidad; nuestro sistema de salud, nuestras calles, nuestra planeación urbana, nuestro sistema judicial y nuestra vida diaria en general evidencian que los valores de la academia y sus contenidos están desarticulados de nuestra realidad. Si reconocemos que la universidad forma parte de un contexto sobre el cual podemos discutir y trabajar, la resolución de algunos problemas locales se puede transformar en material de trabajo para la enseñanza y el aprendizaje, empoderando las prácticas académicas para que tengan una incidencia positiva en la realidad y proporcionando a todos herramientas que permitan procesos de transformación social.

Es evidente cómo cada vez más nos distanciamos de nuestros contextos, de los sitios que habitamos y de los lugares en que nuestras prácticas disciplinares tienen un impacto. Vale la pena preguntar si este distanciamiento

hace más fácil efectuar acciones, procesos o transformaciones que consideramos erróneos o sobre los cuales nuestros intereses personales se superponen frente al bien común. ¿Es acaso este distanciamiento lo que nos hace cada vez más carentes de responsabilidad frente a nuestras acciones y en detrimento de nuestro entorno?

Las dificultades que generan el desentendimiento de nuestro contexto y las incongruencias derivadas del tiempo establecido para el desarrollo de las actividades académicas se pueden visualizar con algunos problemas sociales que trastocan nuestro territorio; es necesario tratar de indagar, si es posible dentro del espacio de la universidad, proporcionar herramientas para la solución de estos conflictos:

1. La violencia y discriminación hacia mujeres, gays, lesbianas, bisexuales y transexuales forman parte de la realidad social en el país. La iniquidad y falta de oportunidades laborales, la alarmante intolerancia de algunos grupos de la sociedad frente a otros géneros o manifestaciones culturales y de pensamiento también son parte de lo que constituyen en gran medida la violencia de género en Colombia y, por lo tanto, la realidad social en la que todos nos desenvolvemos. Esto invita a preguntarnos si tales conductas también se presentan dentro de la universidad y si la universidad puede cumplir algún papel en la transformación de estos problemas. Diferentes respuestas a esta pregunta surgen de algunos estudiantes, entre quienes consideran que en ciertas clases el trato hacia hombres y mujeres es diferente, hasta quienes afirman haber tenido profesores que decían en clase que su carrera no era para mujeres, como también en la distribución de las labores y responsabilidades en los trabajos grupales.

Durante dos de mis clases en el primer semestre de 2016 y una del periodo intermedio del mismo año, puse en discusión la anécdota de una amiga durante su época como estudiante universitaria de ingeniería. Ella relataba que era usual (y le molestaba mucho) que en los trabajos en grupo los hombres les dijeran a las mujeres “yo me encargo del trabajo, tú lo pones bonito y haces las conclusiones”.

Frente a este testimonio es particular ver cómo numerosos estudiantes se sienten identificados con esta dinámica que, aunque fundida en la cotidianidad, implica una delimitación y discriminación de los ro-

les dentro de las dinámicas grupales entre géneros. En este punto, caben las siguientes preguntas: ¿Es fundamental para el ámbito educativo ser un espacio incluyente y libre de discriminación de todo tipo? ¿Qué papel desempeña y puede llegar a desempeñar la universidad en la construcción de espacios de inclusión? ¿Es posible que la desigualdad de género sea uno de esos planteamientos que en el papel se presentan como fundamentales para las universidades, pero que en la práctica no se llevan a cabo por completo? ¿Tendría un impacto en la sociedad colombiana que se fortalecieran estos aspectos en la educación?

2. Los alarmantes índices de deshonestidad académica a escala global, además de cuestionar la estructura del sistema educativo, preguntan si hay una relación directa de esta constante con la corrupción y el manejo deshonesto de los recursos públicos y privados en la sociedad.

Durante el primer semestre del 2016, tuve la oportunidad de formar parte de un grupo de trabajo enfocado en desarrollar una campaña contra el plagio. En él se encontraban varias unidades de la universidad (Comunicaciones, Vicerrectoría Académica, representante de los estudiantes, Bienestar Universitario y Departamento de Humanidades). Se planteó el reto de una campaña en contra del plagio. Después de una fase de investigación en la que se hicieron encuestas entre los estudiantes, se debatió sobre las propuestas de implementación de la campaña. Una contradicción resultó de intentar plantear una estrategia obvia, en parte porque aparentemente la mayoría de los detonantes para la deshonestidad académica tienen que ver con los planteamientos y la estructura de la educación actual. Pasar una asignatura, subir el promedio, tener que tomar un crédito bancario, falta de tiempo libre, desinterés frente a una asignatura obligatoria, son motivos que el esquema educativo ha generado. Desde este punto de vista, lo menos sano sería plantear una campaña en la que se busca condenar el plagio y se le trata como algo inherente a los estudiantes y ajeno al sistema educativo.

Si la universidad y el sistema educativo colombiano actual no resuelven estos problemas que generan deshonestidad académica, no resulta coherente plantear campañas para evitar este problema. Las campañas omniscientes implican un sentido de pertenencia grupal,

pero nunca un grado de reflexión crítica ni de responsabilidad. Si estamos pensando en una educación que busca una relación constante entre lo que pasa dentro y fuera de la universidad, este tipo de campañas no generan las herramientas suficientes para que el estudiante construya un carácter claro y responsable. ¿Tiene la universidad una incidencia en lo que pasa en la política o es la política la que determina todo lo que sucede en la universidad? ¿Es la implementación de campañas morales e ideológicas la solución a los problemas o es posible entender a los miembros de la comunidad universitaria como seres pensantes y autónomos para proporcionarles espacios de discusión de problemas?

Cuando una institución educativa o el sistema educativo de un país generan condiciones de estrés psicológico mediante presiones económicas (becas, préstamos) y de tiempo (horas de estudio vs. horas de tiempo libre) simultáneas a la implementación de una idea de éxito y autoestima que se encuentra subordinada a la valoración de los individuos por números o notas (la idea del promedio y el éxito), surgen problemas tales como la deshonestidad académica, teniendo en cuenta que con estas presiones el aprendizaje pasa a un segundo lugar, volviéndose prioridad para quien estudia pasar sobre aprender, el promedio sobre el proceso, el dinero sobre la autoestima, la optimización del tiempo sobre el disfrute del tiempo, el título sobre el conocimiento, la individualidad sobre la diferencia, la uniformidad sobre la tolerancia.

De todos estos desencuentros y contradicciones, surgen varios de los problemas anteriormente mencionados, lo cual me hace preguntar quién es el sistema educativo. Si el sistema educativo somos nosotros, estudiantes y profesores, es entonces dentro de nuestra propia estructura donde están las soluciones a todos los problemas de la educación contemporánea. Si el sistema educativo es el gobierno, las soluciones a todos los problemas de la educación contemporánea están mediadas por los intereses de turno, al igual que son entorpecidas por la burocracia que es propia de todo lo gubernamental, la corrupción que es inherente a todo lo relacionado con el poder y la incompetencia que siempre va de la mano con pagar favores con cargos públicos. Si el sistema educativo somos nosotros, tenemos la posibilidad de pensar la idea de educación y poner en práctica todo aquello que nos beneficie como comunidad educativa, por encima de cualquier presión económica o de cualquier otro tipo. Si el sistema educati-

vo es el gobierno, entonces hace rato que no enseñamos y la idea de cambio simplemente no es rentable. Si el sistema educativo somos nosotros, en una educación humana hay que tomar en cuenta los conocimientos y habilidades tácitas de los estudiantes, que tienen relación directa con sus contextos de origen, para que quien estudia y enseña pueda mantener contacto con todo aquello que es de valor sentimental, cultural y de contexto. La empatía puede ser la clave de un proceso en el que todos nos ponemos en juego, permitiendo entender la variedad de matices que constituyen el ser humano, así como sus contradicciones, desmitificando una idea de perfección prejuiciosa que plantea que sólo somos buenos o malos, azules o rojos, de izquierda o de

derecha. La educación debe tener contacto constante con la realidad. La educación debe empezar a significar más que un título, más que un mecanismo de legitimación y de evasión de nuestros miedos e inseguridades. La educación debe permitirnos salir del pánico generalizado en el que nos encontramos y al que estamos sometidos. La educación es una herramienta que nos permite adaptarnos a diferentes contextos para construir conocimiento en vez de ser un mecanismo que se impone en diferentes lugares y sobre las personas, generando visiones únicas y limitadas. ¿Es posible que la academia se convierta en un mecanismo de evasión de nuestras culpas, en un lugar que sirve para ignorar los errores de lo que hacemos con la realidad?

Análisis de un vertedero triangular de pared delgada con Ansys Fluent

Triangular thin-plate weir analysis using Ansys Fluent

ANDRÉS HUMBERTO OTÁLORA CARMONA¹ - GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS²

1. Ingeniero civil. Maestría en Ingeniería Civil.

2. Director de tesis.

Programa de Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

andres.otalora@mail.escuelaing.edu.co - german.santos@escuelaing.edu.co

Recibido: 22/02/2016 Aceptado: 02/04/2016

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

Resumen

En este artículo se presenta la modelación computacional en tres dimensiones de un vertedero triangular de pared delgada sin contracciones, utilizando el *software* de mecánica computacional de fluidos (CFD) Ansys Fluent. Se describen las características del modelo computacional, tales como las consideraciones geométricas, el mallado, el esquema numérico y los parámetros de la modelación de la turbulencia. Se hace un análisis de sensibilidad de la malla para asegurar la independencia de los resultados. Se examinan la fracción de volumen de la mezcla agua - aire, el perfil de velocidades, la trayectoria del chorro, el coeficiente de descarga y el campo de velocidades.

Palabras claves: modelación numérica en 3D, vertedero triangular, coeficiente de descarga, mecánica computacional de fluidos (CFD).

Abstract

This document presents the three dimensional computational modeling of a thin-plate triangular weir without end contractions, using version 16.0 of the Computational Fluid Dynamics (CFD) software Ansys Fluent. The computational characteristics of the model described are: geometry consideration, mesh sensitivity (for independence of results), numerical scheme, and turbulence modeling parameters. Volume fraction of water-air mixture, velocity profile, jet trajectory, discharge coefficient, and velocity field are analyzed.

Keywords: 3D numerical modelling, triangular weir, discharge coefficient, computational fluid dynamics.

INTRODUCCIÓN

Un vertedero hidráulico, en su definición más sencilla y práctica, es un obstáculo creado por un muro o placa de sección transversal particular, el cual permite obtener un control hidráulico al mantener una relación directa y única entre la energía por encima del vertedero y el caudal transitado.

El parámetro que define la eficiencia de la relación entre el caudal y la lámina de agua es el coeficiente de descarga, el cual depende de la geometría del vertedero. Por tanto, conocer el comportamiento de dicho coeficiente es esencial a la hora de diseñar estas estructuras.

Existen distintas clasificaciones de los vertederos, según su geometría, el grosor de los muros y el uso de la estructura. Esta última clasificación define el diseño y la selección del tipo de vertedero que se desea implementar. La presente investigación se enfoca en el comportamiento de un vertedero triangular de pared delgada, sin contracciones.

En general, el coeficiente de descarga, la magnitud de la velocidad, las pérdidas de energía y los demás parámetros hidráulicos se determinan a partir de análisis experimentales realizados en laboratorio. Con la actual capacidad de cómputo, es posible hacer modelos computacionales bastante precisos, que simulen las condiciones reales de operación de cualquier estructura hidráulica, ahorrando tiempo, personal, instalaciones y equipos de medición. Los ingenieros hidráulicos tienen un gran interés en emplear estas nuevas herramientas de diseño y compararlas con los resultados tradicionales. Por tal razón, en este artículo se determinan el comportamiento del coeficiente de descarga y la trayectoria del chorro a partir del *software* de mecánica computacional (CFD) Ansys Fluent, versión 16.0, y se comparan los resultados con los experimentales reportados en la bibliografía existente sobre el tema.

OBJETIVOS

1. Análisis del coeficiente de descarga de un vertedero triangular de pared delgada, a partir de la modelación computacional en el *software* Ansys Fluent.
2. Determinación de la fracción de volumen, las líneas de corriente y la variación longitudinal del perfil de velocidades en un vertedero triangular de pared delgada, a partir de la modelación computacional en el *software* Ansys Fluent.

3. Análisis de la trayectoria de chorro de descarga en un vertedero triangular de pared delgada, a partir de la modelación computacional en el *software* Ansys Fluent.
4. Comparación de la lámina de agua y la trayectoria del chorro con los valores reportados en las referencias bibliográficas.
5. Análisis de la sensibilidad de la malla con los resultados numéricos del modelo computacional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Vertedero triangular

Un vertedero triangular sigue el mismo comportamiento que cualquier vertedero hidráulico de pared delgada. En este caso, la longitud efectiva del vertedero varía linealmente con respecto a la altura de la lámina de agua.

Tomando en cuenta la geometría del vertedero y haciendo un análisis unidimensional de la conservación de la energía en un volumen de control, se tiene que:

$$Q = \frac{8}{15} * C * \sqrt{2 * g} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * H^{\frac{5}{2}} = C_d * H^{\frac{5}{2}} \quad [1]$$

Donde

C: coeficiente de descarga adimensional.

H: lámina de agua desde el punto más bajo.

θ : ángulo del vertedero.

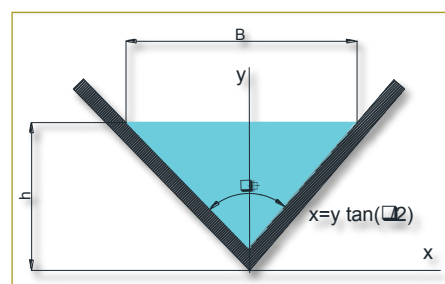


Figura 1. Sección transversal de un vertedero triangular de pared delgada.

Fórmulas experimentales para la determinación del coeficiente de descarga "C"

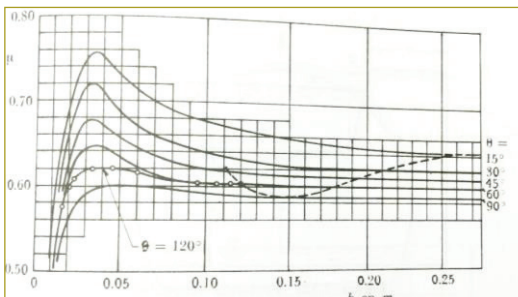
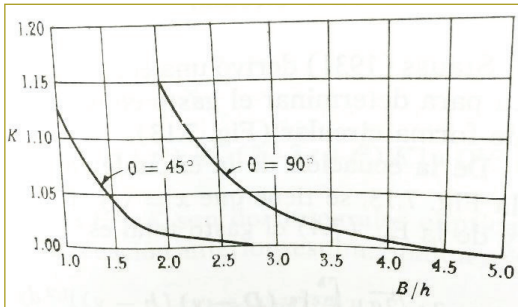
A continuación se describen los estudios para la determinación del coeficiente de descarga en un vertedero

triangular, utilizados para la comparación con los resultados de la modelación computacional.

1. Universidad Católica de Chile (1959)

$$Q = \frac{8}{15} * \sqrt{2g} * \mu * k * \tan \left[\frac{\theta}{2} \right] * b^{\frac{5}{2}} \quad [2]$$

La Universidad Católica de Chile propone la determinación de “μ”, en forma muy similar a la ecuación [1], pero con un parámetro adicional “k”, el cual corrige el coeficiente de descarga a partir del ángulo de abertura del vertedero, y de la relación B/h para un valor de 15° < θ < 120°. Siendo B el ancho del vertedero.



Figuras 2 y 3. Coeficientes de descarga “μ” y “k” para vertederos triangulares, según la metodología de la Universidad Católica de Chile.

2. Gourley y Crimp (1961)

Gourley y Crimp determinaron una ecuación empírica general para establecer el coeficiente de descarga basado en datos experimentales para vertederos de 45°, 60° y 90° (ecuación [3]).

$$C = \frac{1,32 * \tan \left[\frac{\theta}{2} \right]}{b^{0,03}} \quad [3]$$

Donde

h: lámina de agua por encima del vertedero.

θ: ángulo de abertura del vertedero.

3. Hegly (1921)

$$C = \left[0,5812 + \frac{0,00375}{b} \right] * \left\{ 1 + \left[\frac{b^2}{B[b+p]} \right]^2 \right\} \quad [4]$$

Donde

B: ancho del vertedero.

p: altura del muro del vertedero.

h: lámina de agua por encima del vertedero.

Válido para láminas de agua (h) entre 0,10 y 0,5 m.

4. Barr (1909)

$$C = 0,565 + \frac{0,0087}{b^{0,5}} \quad [5]$$

El valor promedio para esta ecuación es de C = 0,593. Se recomienda su aplicación para vertederos que cumplan las siguientes recomendaciones:

$$0,05 \text{ m} \leq h \leq 0,25 \text{ m} \quad ; \quad w \geq 3h \quad ; \quad B \geq 8h$$

h: energía por encima del vertedero.

5. Koch (1923) y Yarnall (1926)

Koch y Yarnall definen un valor único del coeficiente de descarga, independiente de la geometría y de cualquier otro parámetro hidráulico.

$$C = 0,585 \quad [6]$$

Se aconseja el uso en los casos donde θ = 90° con cargas muy grandes, y donde p ≥ 3h ; B ≥ 8h.

6. Heyndrickx (1957)

$$C = \left[0,5775 + 0,214 + b^{1,25} \right] * \left\{ 1 + \left[\frac{b^2}{B[b+w]} \right]^2 \right\} \quad [7]$$

Donde

B: ancho del vertedero.

w: altura del muro del vertedero.

h: energía por encima del vertedero. Se aconseja el uso en los casos donde $\theta = 60^\circ$, con cargas normales.

Fórmulas experimentales para determinar la trayectoria del chorro

Además del análisis del coeficiente de descarga, se estudió el comportamiento del chorro, producido por la caída de las partículas al superar la cresta del vertedero. Para ello se detallan las ecuaciones experimentales encontradas en la bibliografía existente, comparadas con los resultados obtenidos en la modelación computacional realizada con Ansys Fluent.

1. Ecuación de la trayectoria de chorro: Creager (1960)

$$y = x * \tan[\theta] - \frac{x^2}{4 * K * (d + hv) * \text{Cos}^2[\theta]} \quad [8]$$

Donde

y: ordenada de una partícula del chorro.

x: abscisa.

θ : ángulo de la trayectoria de inicio del chorro. $\theta = \text{Arctan}[V_y/V_x]$

K: constante de proporcionalidad que depende h_v/H (Small Dams (2007))

H: energía por encima del vertedero $H=V^2/(2*g)+h$

h_v : columna de velocidad o columna de energía cinética $h_v=V^2/(2*g)$.

2. Ecuación de la trayectoria de chorro: Borda (1766)

$$\frac{y}{b} = \frac{\left(\frac{x}{b} - 0,1\right)^2}{1,55^2} + 0,062 * \frac{x}{b} - 0,186 \text{ para } \frac{x}{b} > 0,50 \quad [9]$$

Donde

y: ordenada de una partícula del chorro.

x: abscisa definida.

h: energía total por encima del vertedero.

3. Ecuación de la trayectoria de chorro: Francis (1976)

$$\frac{y}{b} = \frac{\left(\frac{x}{b} - 0,70\right)^2}{1,42^2} \text{ para } \frac{x}{b} > 1,40 \quad [10]$$

Donde

y: ordenada de una partícula del chorro.

x: abscisa.

h: energía total por encima del vertedero.

4. Software Ansys Fluent

Ansys Fluent es un *software* de la mecánica de fluidos computacional, basado en la solución aproximada de las ecuaciones de Navier - Stokes utilizando volúmenes finitos. La geometría particular se divide en celdas (volúmenes finitos) de cierto tamaño (malla) limitadas por caras (superficies). Están disponibles varios esquemas numéricos tanto para aproximar los términos de las integrales de volumen como los de las integrales de superficie.

Con el propósito de dar a conocer conceptos propios de la modelación computacional, a continuación se da una breve explicación de términos claves para el desarrollo y entendimiento del artículo.

Geometría y espacio computacional

En la mecánica de fluidos computacional, la geometría es la representación gráfica de toda estructura o condición física particular. El espacio computacional representa la totalidad del área o volumen necesario para la adecuada modelación del fenómeno físico.

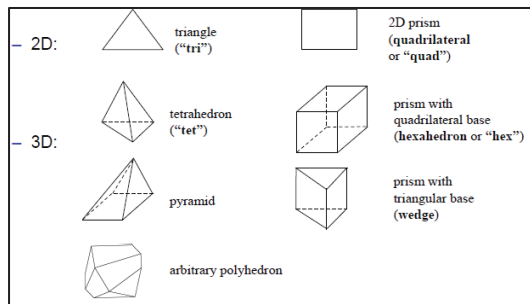
Malla o mallado

Representa la división del espacio computacional en elementos de tamaño definido, en los cuales se solucionan en forma discreta las ecuaciones que definen el flujo.

Una adecuada selección de la malla es de suma importancia antes de realizar cualquier modelación, ya que ésta influye significativamente en la convergencia, la precisión de la solución y el tiempo de cómputo requerido. Por tanto, es crucial identificar aquellas zonas en las cuales es necesario una mayor refinación para obtener fiabilidad de los resultados. Por esta razón se deben tener en cuenta todos los requerimientos de calidad

de la malla, sugeridos por los *softwares* de modelación computacional.

La calidad de la malla en cada geometría particular depende de la densidad, de la relación de longitud de la celda/volumen adyacente, de la forma de la celda (tetraedros versus hexagonal) y del tamaño de cada cara.



Fuente: (Bakker, 2012).

Figura 4. Tipos de celdas para el mallado de la geometría en Ansys Fluent.

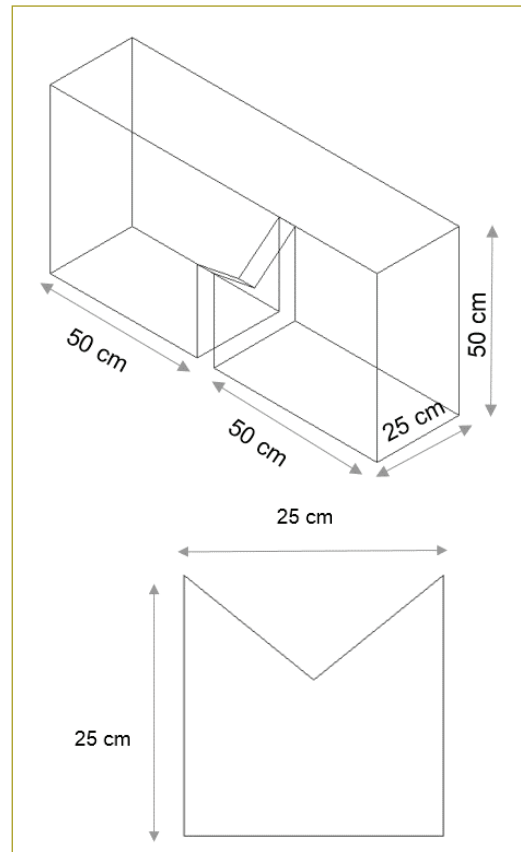
RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, la estructura estudiada es un vertedero triangular de pared delgada, con muros de 5 cm de grosor y un ángulo de 102° , con una altura de 25 cm y un ancho de 25 cm (figura 5), sin contracciones.

Cabe destacar que fue necesario definir un espacio computacional, el cual, además de contener la lámina de agua, permitiera analizar el flujo de aire por encima de ésta. Se seleccionó un paralelepípedo de 25 cm de ancho, 50 cm de alto y 1,0 m de largo. A continuación se mencionan algunos detalles adicionales acerca del espacio computacional y de la elección de sus dimensiones:

- La altura del espacio computacional se determinó a partir del cálculo inicial de la máxima lámina de agua esperada por encima de la estructura (obteniendo un valor de 12 cm con el caudal de modelación seleccionado: 8 l/s), a la que se adicionaron 13 cm más con el propósito de evitar efectos de la condición de frontera superior.
- La distancia a la entrada y la salida del espacio computacional se determinó como dos veces la altura del vertedero.
- El ángulo del vertedero se tomó de 102° , que arroja una buena proporción entre la altura y el ancho del vertedero (ambos de 25 cm).

- Por facilidad en los cálculos, el vertedero no posee contracciones.
- La relación entre altura y grosor es de 1/5, clasificándose como vertedero de pared delgada (Sotelo, 2012).
- La altura del paramento es 0,15 m.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Geometría del vertedero triangular de pared delgada.

Mallado del espacio computacional

Luego de la generación de la geometría en AutoCAD, se procedió a crear el mallado. Tal como se mencionó, el mallado influye significativamente no sólo en la calidad de los resultados, sino también en el tiempo computacional. Para dividir el espacio computacional se exportó la geometría al mallador integrado del Workbench de Ansys como un archivo ".iges" desde el AutoCAD.

La primera modelación realizada cuenta con 1.420.666 celdas y 2.898.348 "caras" a lo largo de la malla. Después se refinó el mallado directamente en Fluent, utilizando la fracción de volumen como parámetro de

refinación, en un rango de 0,46 a 0,50 de porcentaje de agua en la mezcla.

A partir del procedimiento anterior, se obtuvo una malla definitiva con 1.570.382 celdas, equivalente a 3.266.633 “caras” para una variación total de 149.716 celdas y 368.285 caras.

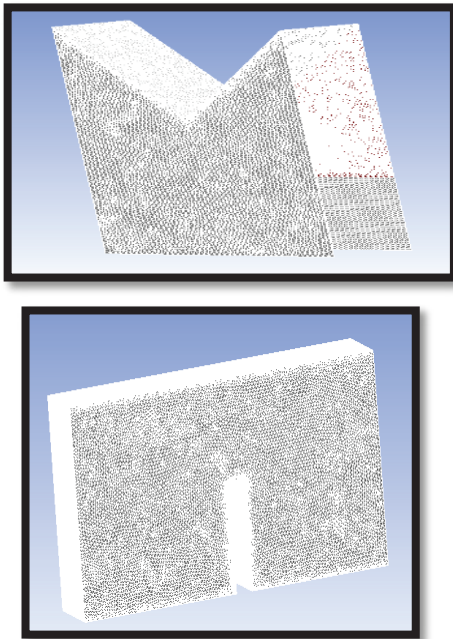


Figura 6. Detalle del mallado en el cuerpo del vertedero rectangular y en el espacio computacional.

Condiciones de frontera

Son los valores que se imponen en zonas específicas de un espacio computacional. Junto con las condiciones iniciales (tiempo) y las ecuaciones diferenciales parciales (Navier-Stokes), definen completamente el problema. Las condiciones de frontera tienen efectos numéricos importantes en la convergencia de la solución.

Esquema numérico

La base de un modelo computacional ajustado a los fenómenos físicos son la selección del modelo de turbulencia y el esquema numérico apropiado para solucionar de manera aproximada las ecuaciones de Navier - Stokes que describen el flujo. A continuación

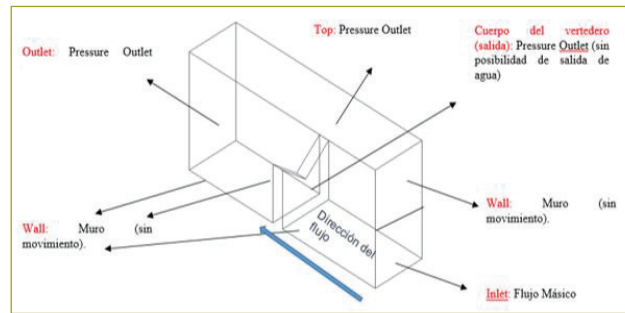


Figura 7. Condiciones de frontera en el espacio computacional del vertedero triangular.

se detallan los esquemas numéricos y los modelos de turbulencias utilizados para la modelación numérica del vertedero triangular.

Esquema de discretización

Los esquemas de discretización del modelo se presentan a continuación (tabla 1).

Tabla 1

Esquema de discretización espacial del vertedero triangular

Variable	Modelo de discretización espacial
Gradiente	Mínimos cuadrados basados en la celda
Presión	Fuerza de cuerpo ponderada
Cantidad de movimiento	Regresivo (<i>upwind</i>) de segundo orden
Fracción de volumen	HRIC modificado
Energía cinética turbulenta	Regresivo (<i>upwind</i>) de segundo orden
Tasa de disipación turbulenta	Regresivo (<i>upwind</i>) de segundo orden

Modelo de flujo a superficie libre

El esquema utilizado para esta condición es la herramienta “VOF” (fracción de volumen de fluido).

Modelo de turbulencia

El modelo de turbulencia utilizado es el $K-\epsilon$, con la función de pared estándar (*Standard Wall Function*). Los valores de K y ϵ en la frontera son, respectivamente, 0,8017 y 0,964, calculados a partir de las ecuaciones [11] y [12].

$$k = \frac{3}{2} (\bar{U} * l)^2 \quad [11]$$

Donde

\bar{U} : velocidad media.

$l = 0,16 \text{ Re}^{-1/8}$, obteniendo

l : tamaño de los remolinos.

L : perímetro hidráulico, obteniendo un valor de

$L = 0,0676 \text{ m}$.

$$\epsilon = C\mu^{\frac{3}{4}} * \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad [12]$$

Donde

U : intensidad turbulenta.

$I = 0,656$.

$l = 0,07 L C\mu^{3/4}$: constante empírica igual a 0,1643.

Criterio de convergencia

El criterio de convergencia se definió a partir de los factores residuales de la cantidad de movimiento y las componentes de velocidad U , V y W . El factor residual corresponde al error absoluto que se presenta en cada iteración, o en términos sencillos, el cambio de la magnitud entre iteraciones. Siendo 1×10^{-4} el error máximo para aceptar la existencia de convergencia.

Adicionalmente, se evaluó el cambio del flujo másico en la entrada y salida del espacio computacional. Se consideró aceptable un valor de 0,008 kg/s, que corresponde a un error de 0,1 % con respecto al flujo másico total.

Otras consideraciones

1. Se tuvieron en cuenta los efectos de la gravedad.
2. Se utilizó un esquema implícito de segundo orden para la modelación del flujo no permanente, con el propósito de acercar el modelo computacional a las condiciones físicas. Se limitó el número de Courant a 0,9 y se utilizaron dos pasos de tiempo por iteración, con una amplitud variable (ajustada por el programa).
3. Se trabajó con la opción de "Open Channel".

Fracción de volumen

Como primer análisis de la modelación, se ha graficado el contorno en tres dimensiones de la fracción de volumen. Se pueden observar el comportamiento de la lámina de agua en el canal de entrada y el chorro de descarga en el canal de salida (figura 8).

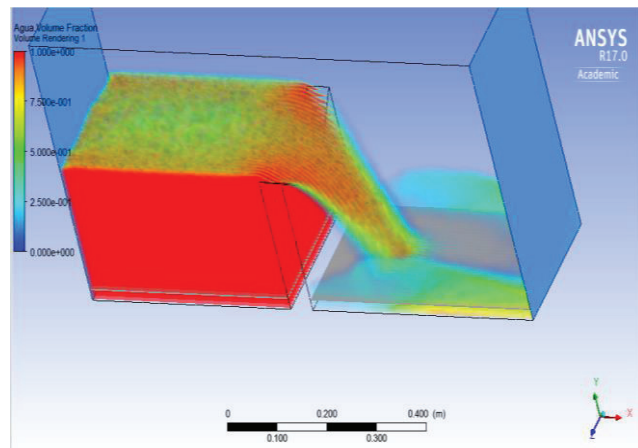


Figura 8. Fracción de volumen en tres dimensiones (3D) en el espacio computacional.

Perfil de flujo

Varios de los análisis que se desarrollarán dependen de la lámina de agua, por lo que es necesario extraer la información en distintos puntos a lo largo del espacio modelado. Para el análisis de la trayectoria del chorro y el coeficiente de descarga se ha generado el perfil de flujo para un plano longitudinal, en el centro del espacio computacional.

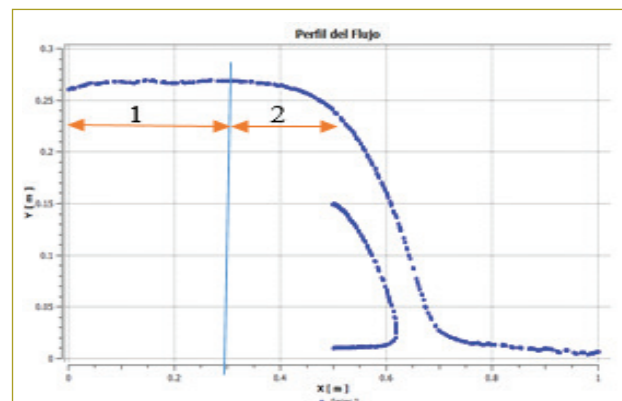


Figura 9. Perfil de flujo en el espacio computacional y líneas de corriente en el chorro.

Como se puede ver (figura 9), el perfil de flujo posee una tendencia estable en el canal de entrada antes de atravesar el vertedero, para posteriormente caer por la estructura, generando un chorro con trayectoria parabólica. Se subdividió el canal de entrada en dos zonas, teniendo en cuenta la fluctuación del nivel.

En la zona 1 se observa una alteración numérica del nivel, debido a la influencia de la condición de frontera en la abscisa 0,0 m. En la zona 2 se presenta una tendencia más uniforme, la cual se utilizará para el cálculo del coeficiente de descarga.

Al superponer el perfil de flujo con las líneas de corriente en esta zona, se pueden apreciar los efectos del impacto del fluido en la parte inferior del canal, el cual crea una elevación del nivel de forma errática, debido a la energía residual. Realizando un acercamiento en la zona de la caída del flujo, se observa un vórtice creado por la diferencia de presión entre la estructura y el chorro, y por el choque de las partículas en el canal, creando alteraciones en las líneas de corriente (figura 10).

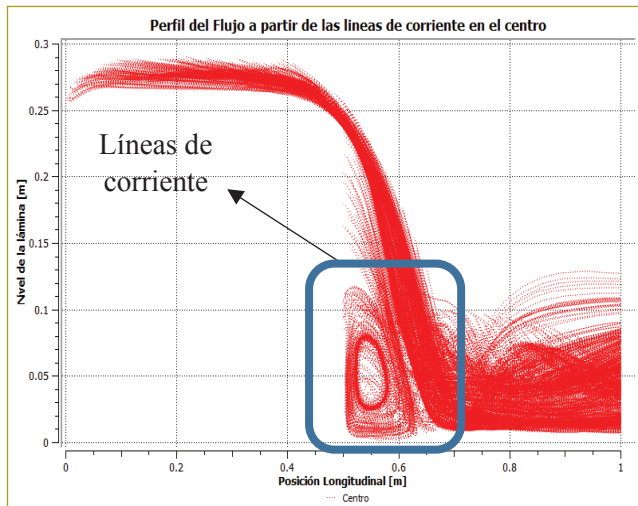


Figura 10. Detalle de la vorticidad: flujo muerto entre el chorro y el vertedero.

Al comparar la trayectoria del chorro generado por la modelación computacional con las funciones definidas por los anteriores autores, se obtiene el siguiente resultado:

Como se puede ver en la figura anterior, existe bastante concordancia entre las funciones evaluadas y los resultados generados con el modelo computacional, con alguna diferencia en la zona media de la trayectoria del chorro.

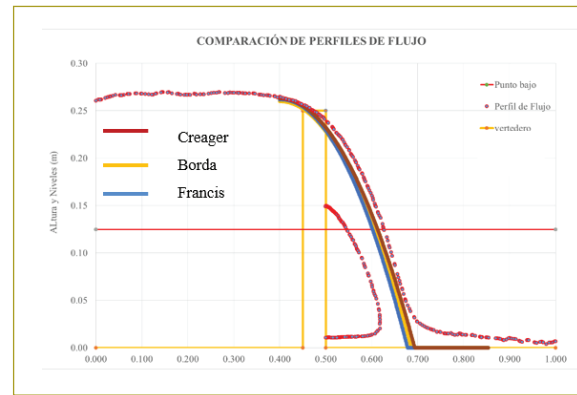


Figura 11. Comparación de la trayectoria del chorro por medio de las ecuaciones definidas por Borda, Creager y Francis, con los resultados del modelo en Ansys Fluent.

Para corroborar la anterior afirmación, se calculó el error porcentual promedio, que arrojó valores de 2, 5 y 8 %, para las funciones de Borda, Creager y Francis, respectivamente.

Un parámetro adicional relevante en este tipo de estructuras es el coeficiente de descarga, el cual indica la relación entre la lámina de agua y el caudal transitado. Con el propósito de evaluar los resultados del modelo computacional, se determinó el coeficiente de descarga a partir de la ecuación [1] y se comparó con los resultados empíricos definidos por varios autores.

Se calculó la lámina (h) como la diferencia entre el punto bajo de la estructura (inicio del ángulo de abertura), correspondiente a 0,15 m, medido desde la solera y la lámina de agua promedio, 0,267 m, medido en la zona número dos del perfil de flujo (figura 9), obteniendo un valor de 0,117 m (ecuación 13).

$$b = y - p_t \tag{13}$$

Donde

h: lámina de agua por encima del punto más bajo del vertedero.

p_t : punto bajo de la abertura del vertedero.

Posteriormente, se calculó el coeficiente de descarga con la ecuación 4, donde “H” es la energía por encima del punto bajo del vertedero, el cual se puede aproximar a “h”, teniendo en cuenta que la energía cinética es despreciable en comparación con la energía de posición, debido a la baja velocidad de aproximación:

$$C = \frac{Q}{\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) * \frac{8}{15} * \sqrt{2 * g * b^{5/2}}} = 0,586$$

Calculando el coeficiente de descarga adimensional “C” y el coeficiente de proporcionalidad dimensional “Cd”, es posible realizar un análisis comparativo de los resultados con las ecuaciones empíricas descritas anteriormente (tabla 2).

Tabla 2
Comparación del coeficiente de descarga entre las ecuaciones empíricas y el modelo computacional

Función utilizada	Coefficiente de descarga (C)	Coefficiente de descarga (Cd) (m ^{1/2} /s)	Error con respecto al determinado (%)
Determinado con el modelo computacional	0,586	1,386	-
Gourley y Crimp (1961)	0,596	1,408	1,69
Hegly (1921)	0,626	1,479	6,97
Barr (1909)	0,590	1,394	0,76
Koch (1923) y Yarnall (1926)	0,585	1,382	0,17
Heyndrickx (1957)	0,605	1,430	6,98

Como se puede apreciar, el coeficiente de descarga se ajusta bastante bien a los datos experimentales definidos por los autores, obteniendo un error promedio de 3,31 %. Debido a que el vertedero modelado posee un ángulo de 102°, las ecuaciones generadas para vertederos triangulares de 90° (Hegly, 1921, y Koch, 1923) tienen un error bastante grande, lo cual nos sugiere que estas metodologías se deben descartar en este problema particular.

Si se eliminan las ecuaciones de Hegly (1921) y Koch (1923), cuya aplicación no es tan conveniente, se obtiene un error promedio de 0,87 %. Por tanto, se puede afirmar que el modelo computacional se aproxima bastante bien a los resultados físicos, por lo que es posible utilizar el esquema numérico en posteriores modelos relacionados con vertederos hidráulicos.

Perfil de velocidades

Ahora se procede a evaluar el desarrollo del perfil de velocidades, para lo cual se ha graficado la magnitud de

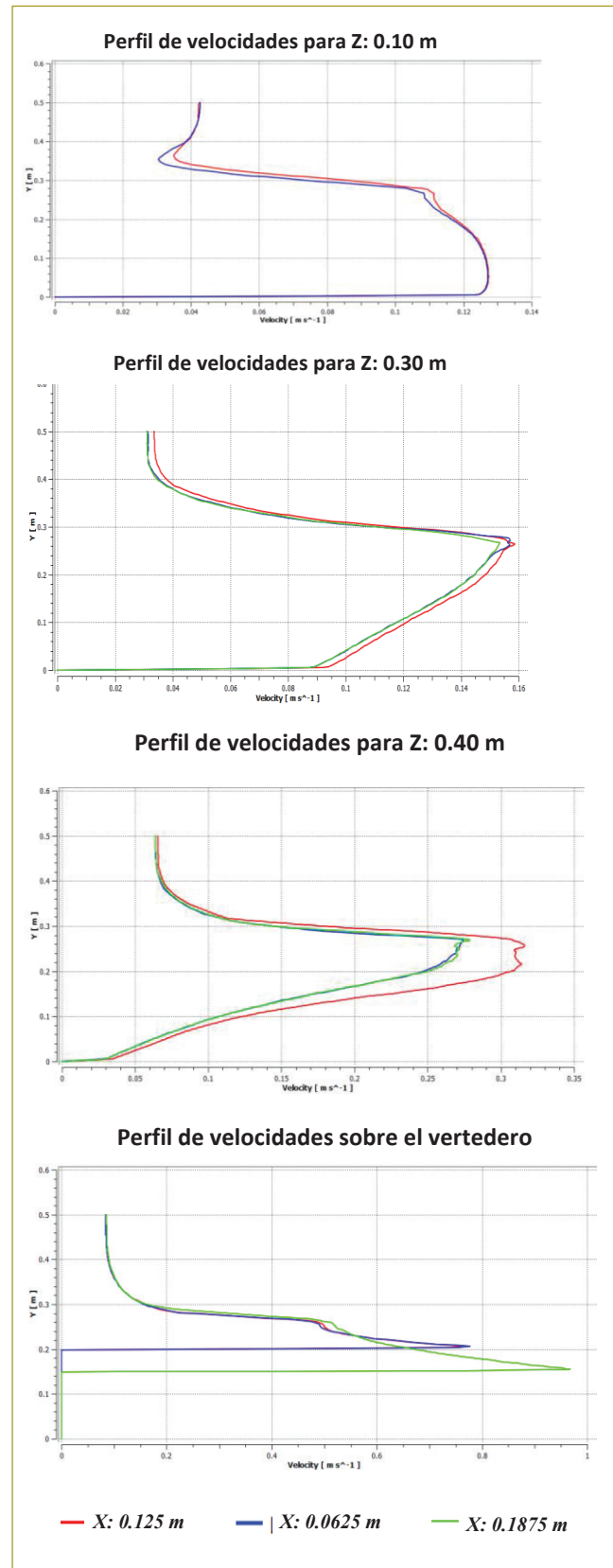


Figura 12. Comparación transversal del perfil de velocidades, para z: 0,10 m, 0,30 m, 0,40 m y sobre el vertedero.

la velocidad con respecto al nivel para cuatro puntos distintos en sentido transversal: 0,0625 m, 0,125 m y 0,1875 m, para la evaluación del perfil a distancias longitudinales de 0,10 m, 0,30 m, 0,40 m y sobre el vertedero. Como se puede ver (figura 12), la variación de la velocidad en términos transversales es despreciable para todas las secciones, menos para la sección sobre el vertedero, por lo que es posible afirmar que al medir la velocidad en un plano transversal “x” a una profundidad “y”, ésta será la misma en zonas alejadas al chorro de descarga.

CONCLUSIONES

1. La trayectoria del chorro definida por el modelo computacional se ajusta a las funciones empíricas desarrolladas por Borda, Creager y Francis.
2. El coeficiente de descarga del vertedero triangular determinado con los resultados de la modelación computacional se ajusta bastante bien a los resultados empíricos de este coeficiente, con un error promedio de 0,87 %.
3. Basado en el resultado del coeficiente de descarga, es posible afirmar que el esquema numérico es el adecuado y es posible utilizarlo para posteriores modelaciones de vertederos hidráulicos de geometrías más complejas.
4. Teniendo en cuenta la bondad del modelo computacional desarrollado, es posible emplearlo para condiciones diferentes, evaluar distintos escenarios y realizar futuros diseños.
5. Se reprodujo adecuadamente la zona de recirculación del flujo denominada “flujo muerto” debido al intercambio de cantidad de movimiento en el impacto con la solera del canal. Este fenómeno se puede apreciar en la alteración de las líneas de corriente entre el vertedero y el chorro de descarga.
6. El perfil de velocidades varía muy poco en la dirección del eje transversal, pero sí en la longitudinal. Cambia considerablemente a medida que se acerca al vertedero, pasando de un perfil con máximos para niveles entre 0.1 y 0.12 m, a un perfil donde la velocidad es máxima en la caída del chorro.

REFERENCIAS

- Ansys Fluent Theory Guide* (2013). Version 15.0. Canonsburg PA: Southpointe 275 Technology Drive.
- Chaudhry, H. (2008) *Open-Chanel Flow* (2nd ed.) Nueva York: Springer.
- Bureau of Reclamation (1987). *Diseño de presas pequeñas* (3rd ed.). A water resources technical publication. Estados Unidos.
- Ho, D. & Guy, C. et al. (2010). Application of computational fluid dynamics to evaluate hydraulic performance of spillways in Australia. *Australian Journal of Civil Engineering*, vol. 6, p. 81.
- Páez, A.M. (2015). Comparación de los resultados de la modelación física y numérica de la obra de seguridad de la presa Cantarrana. Tesis de grado. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Rodríguez, H. A. (2009). *Hidráulica experimental*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sotelo, G. (2012). *Hidráulica general*. México, D.F.: Editorial Limusa.
- Versteeg, H.K. & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed.). Nueva York.

Cálculo del caudal medio vertido de aguas residuales domésticas en Colombia para el año 2013

Flow calculation of domestic wastewater in Colombia for 2013

DIEGO ARMANDO GALLEGO MURIEL¹ - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

1. Ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Maestría en Ingeniería Civil, énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

2. Ingeniero civil. MEEE. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

gallego174@hotmail.com - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 22/02/2016 Aceptado: 10/04/2016

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

Resumen

El caudal de aguas residuales domésticas en Colombia para el 2013 se calculó utilizando la información de consumos medidos por suscriptor del servicio de agua potable, de unos municipios seleccionados, estimando un caudal medio por habitante con una probabilidad de ocurrencia del 99 %.

Palabras claves: caudal medio vertido, suscriptor, micromedición, factor de retorno.

Abstract

The flow of domestic wastewater in Colombia for 2013 was calculated using information measured by subscriber consumption of drinking water in a few selected municipalities, estimating an average flow per occurrence with a probability of 99%.

Keywords: average discharged flow, subscriber, micro measuring, return factor.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se pretende determinar el caudal medio vertido de aguas residuales domésticas del país para el año 2013, utilizando la información de las empresas prestadoras de los servicios de acueducto y alcantarillado en Colombia, la cual se encuentra disponible en el Sistema Único de Información (SUI).

Teniendo en cuenta que no hay disponibilidad de información para el total de la población de los centros poblados del país, se hará el análisis de una porción de la población colombiana, con el objetivo de calcular el caudal con una probabilidad de ocurrencia del 99 %.

Dicho caudal se estimará a partir de los datos de consumo promedio por suscriptor y con un análisis de factor de retorno.

METODOLOGÍA

- Se seleccionan los municipios con una población urbana del país igual o superior al 60 %, de acuerdo con el censo realizado en el año 2005 por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).
- Para los municipios seleccionados se determinan el número de suscriptores, consumo promedio por suscriptor y cobertura de alcantarillado, información disponible en la base de datos del SUI.
- Con la información anterior y la población, se calcula la dotación promedio por habitante.
- Con los aforos de consumos micromedidos, se calcula el caudal medio vertido de aguas residuales domésticas.
- Se compara la dotación por habitante con los establecidos en el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000¹.

Selección de los municipios

La población urbana total de Colombia para 2013 es de 35.869.155 habitantes. Se seleccionan 35 ciudades que de acuerdo con la proyección del DANE para 2013 suman más del 60 % de la población urbana del país² (tabla 1). De esta manera, se considera que los 35 municipios constituyen una muestra representativa del caudal de aguas residuales municipal.

Determinación del número de suscriptores

El cálculo del caudal total vertido de aguas residuales se basa en los consumos por suscriptor. Más adelante se registra el número de suscriptores del servicio de acueducto y alcantarillado existentes en cada municipio (tabla 2).

Distribución de suscriptores por estrato

En la página siguiente se presenta la distribución de suscriptores por estrato. Se observa que el mayor número de suscriptores pertenece a los estratos 2 y 3, que el uso doméstico representa el 93 % del total y que el uso industrial constituye el 0,3 % del total de suscriptores (figura 1).

MICROMEDICIÓN

Para cuantificar el caudal vertido de aguas residuales es necesario contar con la información de consumo de agua. A continuación se presentan los municipios con su correspondiente porcentaje de micromedición (tabla 3).

1. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000, Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 17 de noviembre de 2000.
2. Departamento Nacional de Estadística, <http://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/proyecciones-de-poblacion>.

Tabla 1
Población urbana DANE 2013 por municipio seleccionado

N.º	Departamento	Municipio	Población DANE 2013	% del total nacional
	Colombia	Total nacional	35.869.155	
1	Bogotá, D.C.	Bogotá, D.C.	7.658.081	21,35
2	Antioquia	Medellín	2.386.233	6,65
3	Valle del Cauca	Cali	2.283.035	6,36
4	Atlántico	Barranquilla	1.203.066	3,35
5	Bolívar	Cartagena	935.524	2,61
6	Norte de Santander	Cúcuta	615.780	1,72
7	Atlántico	Soledad	581.971	1,62
8	Santander	Bucaramanga	520.344	1,45
9	Tolima	Ibagué	512.700	1,43
10	Cundinamarca	Soacha	483.172	1,35
11	Magdalena	Santa Marta	450.016	1,25
12	Meta	Villavicencio	439.517	1,23
13	Antioquia	Bello	430.548	1,20
14	Risaralda	Pereira	391.126	1,09
15	Cesar	Valledupar	368.628	1,03
16	Caldas	Manizales	365.849	1,02
17	Nariño	Pasto	354.814	0,99
18	Valle del Cauca	Buenaventura	350.189	0,98
19	Córdoba	Montería	330.313	0,92
20	Huila	Neiva	318.279	0,89
21	Quindío	Armenia	285.644	0,80
22	Santander	Floridablanca	254.156	0,71
23	Sucre	Sincelejo	249.930	0,70
24	Cauca	Popayán	242.641	0,68
25	Valle del Cauca	Palmira	241.155	0,67
26	Antioquia	Itagüí	239.074	0,67
27	Antioquia	Envigado	204.357	0,57
28	La Guajira	Riohacha	203.837	0,57
29	Risaralda	Dosquebradas	186.373	0,52
30	Valle del Cauca	Tuluá	178.241	0,50
31	Boyacá	Tunja	173.655	0,48
32	Santander	Barrancabermeja	173.288	0,48
33	Santander	Girón	152.192	0,42
34	Antioquia	Apartadó	144.976	0,40
35	Caquetá	Florencia	144.849	0,40
		Total 35 ciudades	23.908.577	67,1

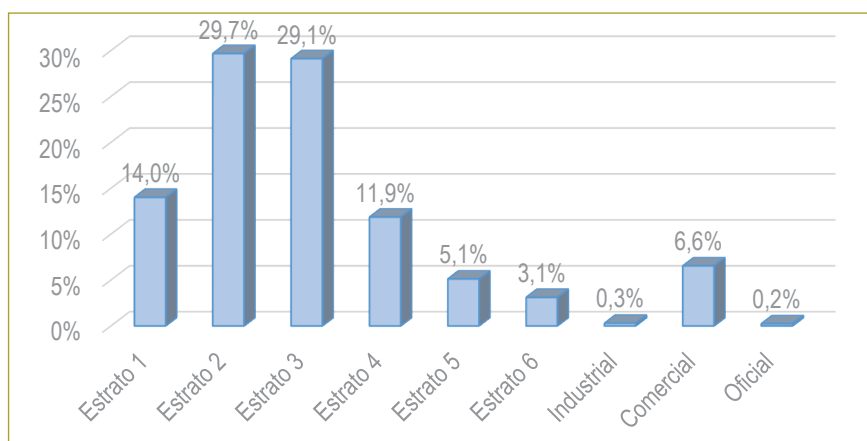


Figura 1. Distribución de suscriptores por estrato.

Tabla 2
Municipios seleccionados³

Municipio	Empresa	Acueducto	Alcantarillado
Cartagena	Aguas de Cartagena S.A. ESP	204.985	181.922
Bogota, D.C.	Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá ESP	1.762.693	1.732.956
Soacha		96.722	74.478
Barranquilla	Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. ESP	255.759	243.578
Soledad		106.255	77.237
Ibagué	Empresa Ibaguereña de Acueducto y Alcantarillado S.A ESP oficial	115.415	111.444
Popayán	Acueducto y Alcantarillado de Popayán S.A. ESP	66.872	63.076
Soacha	Empresa de Acueducto y Alcantarillado El Rincón S.A.	3834	3832
Santa Marta	Compañía del Acueducto y Alcantarillado Metropolitano de Santa Marta S.A. ESP	83.974	73.425
Pasto	Empresa de Obras Sanitarias de Pasto Empopasto S.A. ESP	66.486	71.623
Dosquebradas	Compañía de Servicios Públicos Domiciliarios S.A. ESP	4160	4089
Pereira		193	162
Bucaramanga	Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP	139.464	138.792
Floridablanca		66.362	65.745
Girón		25.295	25.056
Bello	Empresas Públicas de Medellín ESP	101.390	98.287
Medellín		695.726	676.373
Itagüí		74.999	73.848
Envigado		64.185	64.543
Florencia	Empresa de Servicios de Florencia S.A. ESP	38.700	25.429
Villavicencio	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Villavicencio ESP	88.035	89.644
Dosquebradas	Serviciudad ESP	39.307	46.257
Armenia	Empresas Públicas de Armenia	85.787	84.543
Soacha	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Santa Ana ESP S.A.	4483	4419
Manizales	Aguas de Manizales S.A. ESP	97.172	93.308
Tunja	Proactiva Aguas de Tunja S.A. ESP	45.011	44.673
Dosquebradas	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Pereira S.A. ESP	1257	0
Pereira		129.350	123.952
Neiva	Empresas Públicas de Neiva ESP	92.179	90.040
Cali	Empresas Municipales de Cali (Emcali) EICE ESP	550.585	546.729
Palmira		739	0
Medellín	Corporación de Acueducto Multiveredal Santa Elena	1256	0
Montería	Proactiva Aguas de Montería S.A. ESP	82.505	35.944
Tuluá	Centroaguas S.A. ESP	48.244	47.830
Buenaventura	Hidropacífico S.A. ESP	44.282	28.225
Sincelejo	Aguas de la Sabana S.A. ESP	47.345	45.760
Barrancabermeja	Aguas de Barrancabermeja S.A. ESP	54.422	42.886
Cúcuta	Aguas Kpital Cúcuta S.A. ESP	152.942	147.339
Apartadó	Aguas de Urabá S.A. ESP	7857	19.841
Palmira	Aquaoccidente S.A. ESP	66.576	65.432
Total		9.643.561	536.2717

3. Página web Sistema Único de Información (SUI)
<http://www.sui.gov.co/SUIAuth/portada.jsp?servicioPortada=1>

Tabla 3
Porcentaje de micromedición⁴

Municipio	% de micromedición
Bogotá, D.C.	96,60
Medellín	99,10
Cali	95,30
Barranquilla	85,40
Cartagena	93,80
Cúcuta	98,30
Soledad	83,50
Bucaramanga	96,80
Ibagué	75,50
Soacha	98,70
Santa Marta	68,40
Villavicencio	83,20
Bello	98,80
Pereira	96,70
Valledupar	56,50
Manizales	98,60
Pasto	87,80
Buenaventura	63,30
Montería	87,20
Neiva	70,00
Armenia	79,40
Floridablanca	99,10
Sincelejo	78,50
Popayán	90,30
Palmira	93,40
Itagüí	98,90
Envigado	99,90
Riohacha	6,90
Dosquebradas	80,30
Tuluá	97,30
Tunja	98,60
Barrancabermeja	73,50
Girón	99,80
Florencia	85,50

Como se puede observar, el municipio de Riohacha tiene un porcentaje de micromedición de 6,9 %, lo cual indica que el valor promedio de consumo no refleja la realidad, por lo cual debe retirarse de la muestra seleccionada.

Los consumos promedio por suscriptor para el año 2013 se presentan en la tabla siguiente (tabla 4).

Probabilidad de ocurrencia del consumo mensual.

La probabilidad de ocurrencia de los consumos mensuales se calcula utilizando el método de Henry:

1. Se tabulan los datos en tres columnas.
2. En la primera columna se coloca el número de orden de cada dato o número de posición dentro de la serie ascendente de los datos, comenzando por el número 1.
3. En la segunda columna se organizan los datos en orden ascendente de magnitud.
4. En la columna 3 se calculan la frecuencia, probabilidad o porcentaje de ocurrencia del dato correspondiente:

$$f = \frac{100 m}{n + 1}$$

5. Sobre el papel normal de probabilidad se grafica el valor del dato observado contra la frecuencia o probabilidad y se hace una regresión lineal de los datos mediante ajuste por mínimos cuadrados. Si los datos son ajustables a una recta, con una buena correlación, la distribución es normal y se pueden aplicar los estadísticos de dicha distribución⁵.

Se efectuaron las regresiones lineales para cada uno de los meses del año; sin embargo, se muestran las correspondientes a los meses de enero, junio y diciembre, que se incluyen posteriormente (figuras 2 a 4).

Consumos mensuales

Una vez realizado el procedimiento para cada uno de los meses, los consumos mensuales por suscriptor ajustados estadísticamente, para el total de 34 municipios, son los indicados más adelante (tabla 5 y figura 14), para una probabilidad del 50 y 99 %, respectivamente.

4. Página web Sistema Único de Información (SUI) <http://www.sui.gov.co/SUIAuth/portada.jsp?servicioPortada=1>.

5. *Tratamiento de aguas residuales*. Jairo Romero Rojas.

Tabla 4
Consumo promedio por suscriptor año 2013, m³/mes⁶

Departamento	Municipio	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	sept.	oct.	nov.	dic.	Promedio
Antioquia	Medellín	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Antioquia	Bello	16	16	14	16	14	15	14	15	15	14	15	15	15
Antioquia	Itagüí	16	17	16	15	16	16	16	16	17	16	16	16	16
Antioquia	Envigado	16	16	16	16	16	16	15	16	17	16	16	16	16
Atlántico	Barranquilla	19	18	19	20	20	19	20	19	19	19	19	19	19
Atlántico	Soledad	13	12	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Bogotá, D.C.	Bogotá, D.C.	24	25	25	27	24	25	27	26	25	26	24	27	25
Bolívar	Cartagena	19	19	19	20	19	19	19	19	19	18	18	19	19
Boyacá	Tunja	12	11	11	12	13	12	12	12	12	13	13	12	12
Caldas	Manizales	15	16	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Caquetá	Florencia	20	21	16	19	19	19	20	18	19	19	21	20	19
Cauca	Popayán	17	16	16	17	17	16	16	16	17	17	16	16	16
Cesar	Valledupar	27	27	27	28	28	28	28						27
Córdoba	Montería	16	16	16	17	16	17	17	17	17	17	17	16	17
Cundinamarca	Soacha	18	11	19	10	18	17	15	11	18	10	17	10	14
Huila	Neiva	15	16	16	15	16	16	16	17	16	17	17	16	16
La Guajira	Riohacha	11	11	16	11	11	15	12	16	16	16	15	15	14
Magdalena	Santa Marta	15	15	14	14	14	14	14	14	14	14	14	13	14
Meta	Villavicencio	14	15	14	13	15	14	14	13	14	14	14	14	14
Nariño	Pasto	14	13	13	14	14	13	14	14	14	14	12	14	14
Norte de Santander	Cúcuta	19	18	17	19	18	18	19	19	19	18	18	17	18
Quindío	Armenia	14	15	14	14	14	14	15	15	15	15	15	15	14
Risaralda	Pereira	15	14	14	15	15	15	15	15	15	14	15	15	15
Risaralda	Dosquebradas	15	14	13	16	13	14	13	15	14	14	14	13	14
Santander	Bucaramanga	19	19	21	20	19	20	20	20	20	20	19	20	20
Santander	Floridablanca	19	19	19	17	17	20	20	18	18	19	19	18	19
Santander	Barrancabermeja	21	21	23	22	21	21	20	21	20	20	20	21	21
Santander	Girón	20	22	22	19	19	22	22	21	21	21	21	21	21
Sucre	Sincelejo	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Tolima	Ibagué	20	21	18	19	19	19	19	19	19	22	18	19	19
Valle del Cauca	Cali	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
Valle del Cauca	Buenaventura	11	12	11	11	11	11	11	10	11	11	9	10	11
Valle del Cauca	Palmira	17	17	15	17	16	16	16	17	17	16	16	16	16
Valle del Cauca	Tuluá	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15

6. Sistema Único de Información (SUI)
<http://www.sui.gov.co/SUIAuth/portada.jsp?servicioPortada=1>.

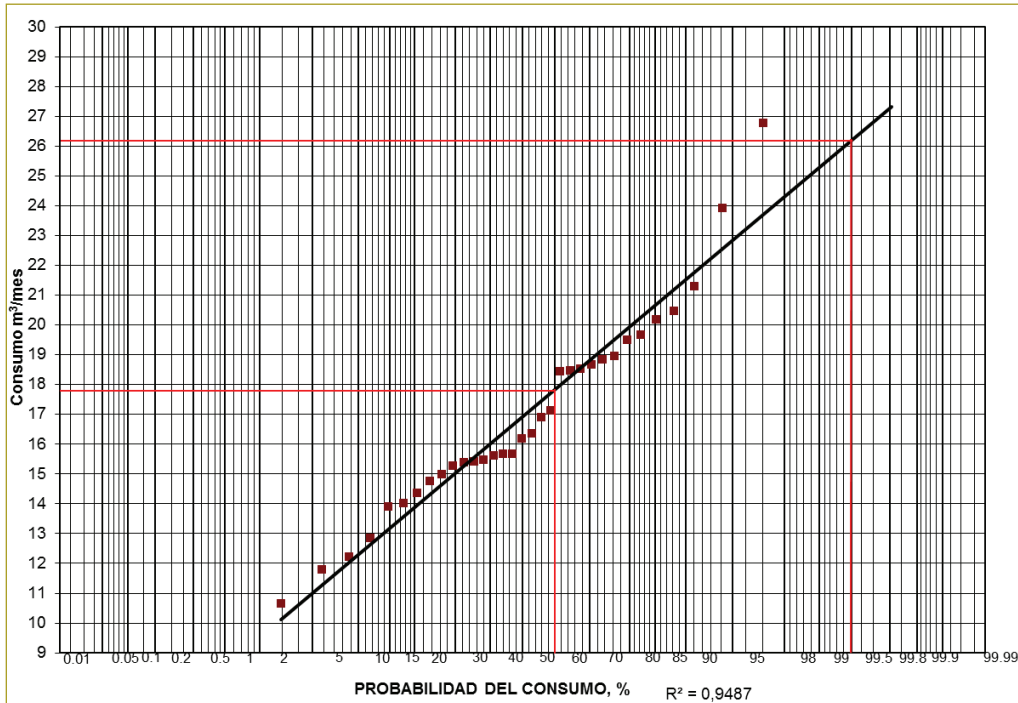


Figura 2. Probabilidad de ocurrencia del consumo, mes de enero.

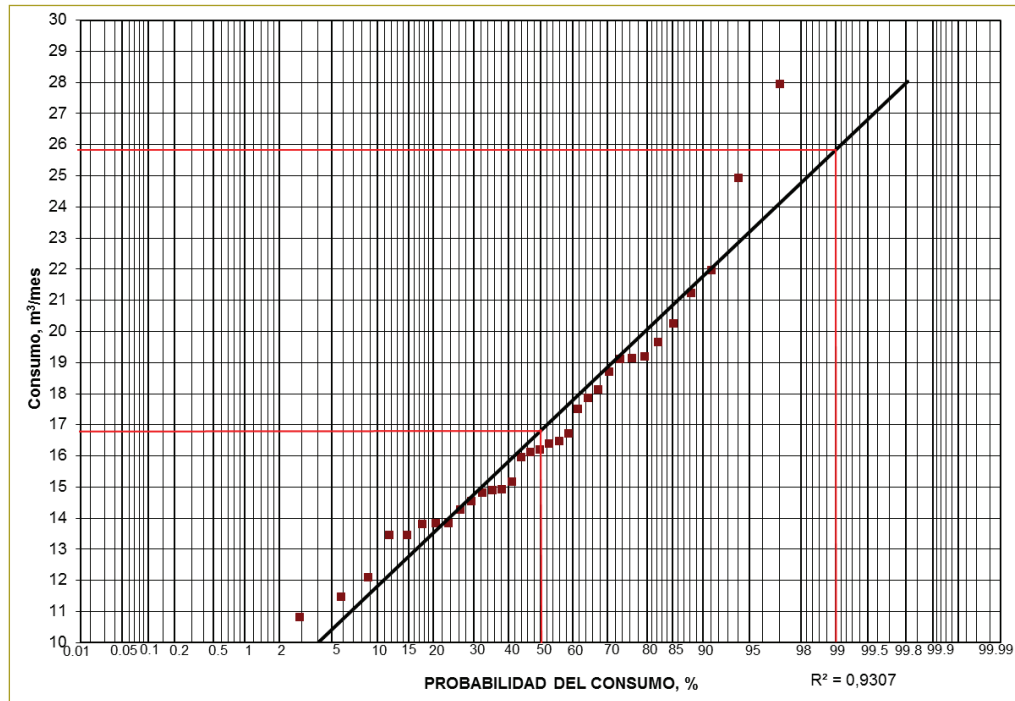


Figura 3. Probabilidad de ocurrencia del consumo, mes de junio.

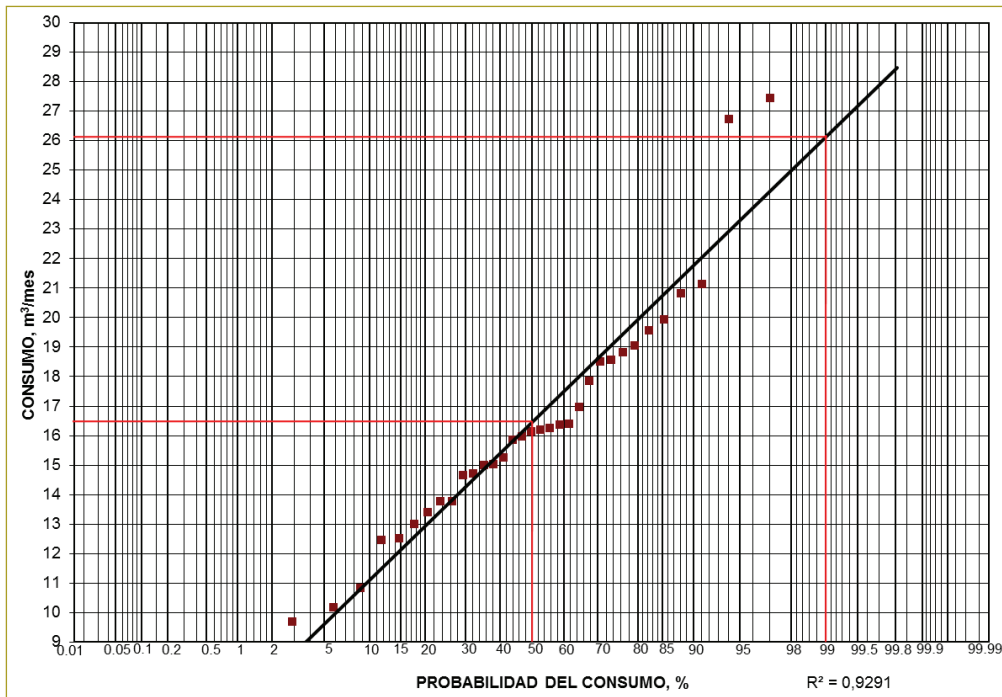


Figura 4. Probabilidad de ocurrencia del consumo, mes de diciembre.

Tabla 5
Percentiles de consumo

Mes	Percentil 50 m³/mes	Percentil 99 m³/mes
Enero	17,8	26,2
Febrero	17,8	26,0
Marzo	16,6	25,8
Abril	16,8	26,2
Mayo	16,6	25,0
Junio	16,8	25,9
Julio	16,8	26,2
Agosto	16,8	26,0
Septiembre	16,9	25,5
Octubre	16,7	26,1
Noviembre	16,5	25,7
Diciembre	16,5	26,1
Promedio	16,9	25,9

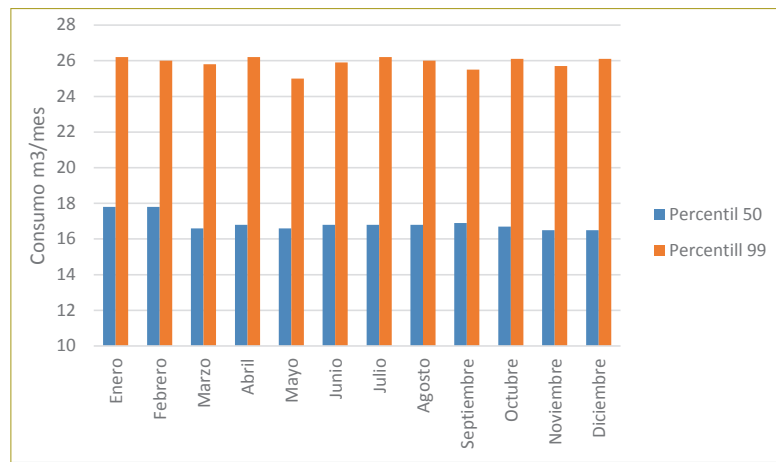


Figura 5. Consumo mensual por suscriptor.

Seguidamente, se presentan los resultados de consumos mensuales por habitante para una probabilidad del 99 % (tabla 6).

Así mismo, se indica que el caudal de consumo mensual por habitante es de $6,5 \text{ m}^3$, con una probabilidad del 99 %, que corresponde a un consumo de $217 \text{ l/hab} \cdot \text{d}$.

Tabla 6
Cálculo del caudal vertido por habitante

Departamento	Municipio	Total de suscriptores	Promedio de habitantes por vivienda	Consumo promedio Percentil 99 m^3/mes	Consumo por habitante m^3/mes
Antioquia	Medellín	695.726	3,7	26	7,0
Antioquia	Bello	101.390	3,7	26	7,0
Antioquia	Itagüí	74.999	3,6	26	7,3
Antioquia	Envigado	64.185	3,5	26	7,4
Atlántico	Barranquilla	255.759	4,8	26	5,5
Atlántico	Soledad	106.255	4,9	26	5,3
Bogotá, D.C.	Bogotá, D.C.	1.762.693	3,8	26	6,8
Bolívar	Cartagena	204.985	4,6	26	5,7
Boyacá	Tunja	45.011	3,7	26	7,0
Caldas	Manizales	97.172	3,5	26	7,4
Caquetá	Florencia	38.700	4,2	26	6,1
Cauca	Popayán	66.872	4,0	26	6,5
Cesar	Valledupar	45.300	4,3	26	6,0
Córdoba	Montería	82.505	4,7	26	5,6
Cundinamarca	Soacha	96.722	4,1	26	6,4
Huila	Neiva	92.179	3,8	26	6,9
Magdalena	Santa Marta	83.974	4,5	26	5,8
Meta	Villavicencio	88.035	3,9	26	6,6
Nariño	Pasto	66.486	4,1	26	6,3
Norte de Santander	Cúcuta	152.942	4,2	26	6,2
Quindío	Armenia	85.787	3,4	26	7,7
Risaralda	Pereira	129.350	3,6	26	7,2
Risaralda	Dosquebradas	43.467	3,9	26	6,7
Santander	Bucaramanga	139.464	3,9	26	6,6
Santander	Floridablanca	66.362	4,3	26	6,1
Santander	Barrancabermeja	54.422	3,7	26	7,0
Santander	Girón	25.295	4,4	26	5,9
Sucre	Sincelejo	47.345	4,6	26	5,6
Tolima	Ibagué	115.415	3,8	26	6,8
Valle del Cauca	Cali	550.585	4,0	26	6,5
Valle del Cauca	Buenaventura	44.282	4,3	26	6,0
Valle del Cauca	Palmira	66.576	3,9	26	6,7
Valle del Cauca	Tuluá	48.244	3,7	26	7,0

Promedio

6,5

Caudal de aguas residuales

Se realiza el cálculo utilizando el valor de consumo del percentil 99, y la población total urbana del país para el año 2013.

- Consumo promedio por habitante = $217 \text{ l/hab} \cdot \text{d}$.
- Factor de retorno = 0,8.
- Población total en cabecera 35.869.155 habitantes.

$$\text{Caudal de AR} = 217 \times 0,8 = 174 \frac{L}{\text{hab} \cdot \text{día}}$$

$$174 \frac{L}{\text{hab} \cdot \text{día}} \times 35.869.155 \text{ hab} \times$$

$$10^{-3} \frac{m^3}{l} / l = 6.241.233 \frac{m^3}{d} = 72,2 \frac{m^3}{s}$$

CONCLUSIONES

- El valor de consumo por habitante día para el año 2013 es de 217 l, valor que corresponde, para un porcentaje máximo de pérdidas técnicas del 25 %, una dotación neta de 217 (1-0,25) = 163 l/hab · d, valor superior a las dotaciones netas máximas recomendadas por el Ministerio de Desarrollo Económico en la Resolución 1096 de 2000, RAS-2000.

TABLA NÚMERO 9

Nivel de complejidad del sistema	Dotación neta máxima para poblaciones con Clima Frio o Templado (L/hab.día)	Dotación neta máxima para poblaciones con Clima Cálido (L/hab.día)
Bajo	90	100
Medio	115	125
Medio alto	125	135
Alto	140	150

Ilustración 1. Dotaciones mínima y máxima, Resolución 1096 de 2000⁷.

- El caudal de aguas residuales domésticas para un factor de retorno igual a 0,8 es de 175 l/hab · d.
- La proyección de caudal de aguas residuales hasta el año 2020, teniendo en cuenta los datos disponibles del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, se muestra a continuación:

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Caudal AR (m ³ /s)	72,2	73,2	74,2	75,2	76,2	77,1	78,1	79,0

REFERENCIAS

Página web del Departamento Nacional de Estadística <http://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/proyecciones-de-poblacion>.
Portal web Sistema Único de Información (SUI), tópicos comerciales y técnico-operativo. <http://www.sui.gov.co/SUIAuth/portada.jsp?servicioPortada=1>
Tratamiento de aguas residuales, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería 2013, Jairo Romero Rojas.
Resolución 1096 del 17 de noviembre de 2000, Ministerio de Desarrollo Económico, "Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS".
Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS - 2000, Ministerio de Desarrollo Económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 17 de noviembre de 2000.

7. Resolución 1096 de 2000. Ministerio de Desarrollo Económico. Artículo 67. Dotación neta mínima y máxima. Modificado por el art. 1, Resolución 2320 de 2009 del Ministerio de Ambiente.

Cambios en los tiempos de permanencia en parada debido al nuevo método de acceso implementado con el Sistema Integrado de Transporte Público

Changes in stop times due to the new access method implemented in the Integrated Public Transport System (SITP) in Bogotá

FERNANDA BAUTISTA BAUTISTA¹ - CARLOS FELIPE URAZÁN BONELLS²

1. Ingeniera civil. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transportes de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniero civil. Especialista en Administración de Obras de Construcción y doctor en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte. Profesor titular de la Universidad de La Salle.

ing.ferbautista@gmail.com - caurazan@unisalle.edu.co

Recibido: 15/03/2016 Aceptado: 20/06/2016

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

Resumen

La introducción del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) en Bogotá trajo consigo un sinnúmero de cambios positivos hacia la modernización y calidad del servicio. Entre esos cambios está el paso de pagar el pasaje en efectivo a pagar con tarjeta prepagada en el bus, lo que implicó un aumento en el tiempo de parada debido a hechos como el uso de torniquete una vez validado el pago, la demora de algunos usuarios en encontrar la tarjeta y otras eventualidades, como la demora del conductor para salir del paradero por atender preguntas de los usuarios respecto de la ruta. Es importante recordar que este trabajo se desarrolló cuando el SITP llevaba cerca de un 60 % de implementación y, por tanto, varios usuarios no se habían familiarizado con la señalética de las rutas y la costumbre de pagar con tarjeta.

El aumento del tiempo promedio de ascenso de pasajeros registrado para el SITP es 1,41 veces el correspondiente al Transporte Público Colectivo (TPC) en hora punta de la tarde, pero la relación es casi de 1,00 en hora punta de la mañana. A pesar de lo último, se espera que con una mayor participación del SITP en el sistema de la ciudad el número de usuarios que va a concentrarse en los paraderos sea mayor y, por ende, esas diferencias serán más significativas.

Por lo anterior, se plantea la posibilidad de aplicar mecanismos empleados en otras ciudades, con el fin de ayudar a reducir el tiempo de

ascenso y descenso, y por tanto el tiempo total de parada, a la vez que influiría en un mejor tiempo de recorrido. La simulación de algunas medidas, como el uso de buses de plataforma baja, puertas anchas en los buses y pago anticipado del pasaje en estación, mostró que se podría ahorrar un 50 % de tiempo total de parada respecto a la actual situación del SITP.

Palabras claves: sistema de pago con tarjeta inteligente, Sistema Integrado de Transporte Público, tasa de ascenso y descenso de pasajeros de bus, tiempo de parada en transporte público.

Abstract

The introduction of the Integrated Public Transport System in Bogotá (SITP for its initials in Spanish) brought about a number of positive changes towards modernization and a better quality of service. Among these changes there exists the payment method with a pre-paid bus card. These changes created an increase in stop time due to events such as the use of the turnstile after payment validation; the delay of some users finding the card, and other eventualities such as the time spent by the driver regarding user inquiries about the bus route. It is important to take into account that this work was developed when

SITP had about 60% implementation, therefore several users were not familiar with routes information and the usage of pre-paid cards. The increase in the average passengers entrance time registered for SITP is 1.41 times the one registered for Collective Public Transport (CTP) in the afternoon rush hour, but the ratio is about 1.00 in the morning rush hour. Despite the latter, it is expected that with greater SITP participation in the city dynamics, the number of users at bus stops will be higher, and therefore these differences will be more significant. Consequently, the possibility of applying mechanisms used in other cities in order to help reduce passengers' ascent and descent times, thus total stop time, will influence for an improvement in travel time. The simulation measures, such as the use of low-floor buses, wide doors on buses, and previous payment in station, showed that it is expected to save 50% of the total stop time compared to the current SITP reality.

Keywords: ascent and descent times, bus-passenger ratio, integrated public transport system, public transport, bus stop time, smart card, payment method.

INTRODUCCIÓN

El transporte público en Bogotá tenía una gran deuda con la ciudadanía: un servicio con parámetros mínimos de calidad [1]. El primer gran paso en generar un cambio fue la puesta en marcha del sistema BRT (*Bus Rapid Transit*) Transmilenio en 2001 [2]. El siguiente paso que cabe destacar en el proceso de mejora del sistema de transporte público de la ciudad fue la implementación inicial del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), que adoptó como principales medidas la adecuación de la oferta por medio de una reducción de flota y renovación vehicular, a la vez que incorporó el pago del pasaje por medio de tarjeta electrónica y una mayor regulación para el uso obligatorio de los paraderos designados [3], pues si bien antes existían los paraderos, su uso no era disciplinado por parte de los conductores y, por tanto, de los usuarios [4].

La importancia que reviste el transporte público en la ciudad se ampara en que es el segundo modo con mayor número de viajes en Bogotá (30 %, de los cuales 20 % es del transporte público colectivo) después de la caminata (46 %) [5]. Pero aún más importante es el hecho de que en el lapso de los reportes de las Encuestas de movilidad de 2011 y 2015 para Bogotá, los viajes en transporte público se incrementaron del 29 al 46,8 % (excluyendo el servicio intermunicipal, que se mantuvo en el 1 %) [6] y [7].

De los anteriores cambios llamó especial atención el dejar de pagar el pasaje en efectivo al sistema de pago

electrónico con tarjeta prepagada dentro del bus, hecho que junto con otros contribuyó a la paulatina desaparición de la denominada “guerra del centavo”, término que describe el irresponsable e inapropiado manejo de los buses por parte de sus conductores, con el fin de acaparar la mayor cantidad posible de pasajeros y sus respectivos pasajes [8]. En estudio previo se analizó que el nuevo sistema de pago aumentaría la tasa promedio de ascenso por pasajero, respecto al pago en efectivo. No obstante, el estudio se hizo antes de la puesta en marcha del SITP, tomando como tasa en el escenario SITP las registradas en los vehículos alimentadores de la estación de Transmilenio “Calle 42”, en los cuales el pago del pasaje se realiza con tarjeta a bordo del bus [9].

Con el propósito de corroborar el incremento en la tasa de ascenso se procedió a efectuar tomas de campo con el SITP, ya en funcionamiento, y registros con servicios del TPC, aún en operación. La toma de información en campo se realizó en hora punta (a.m. y p.m.) en el corredor vial de la calle 72, entre avenida carrera 68 y avenida Boyacá en lo referente al SITP, y en otros tres recorridos para los datos del TPC, cuyo tramo vial principal fue la carrera 7.

Luego, basado en los últimos avances, se hicieron escenarios comparados entre la situación del SITP en Bogotá con otros que operan con pago en efectivo [10] y [11], y con pago por medio de tarjeta prepagada [12].

RESULTADOS

En primer término, vale recordar que el tiempo de permanencia en parada hace referencia al tiempo en el que un vehículo de transporte permanece en la parada, medido desde que el vehículo se detiene hasta el momento en el que el vehículo arranca nuevamente [13]. Ese fue el parámetro de medición de tiempos en campo. La magnitud de este tiempo depende de diversos factores, entre los que podemos encontrar:

- *Demanda de pasajeros.* Número de pasajeros que ascienden y descienden en cada parada. Para el caso de Bogotá se concentra en paraderos fijos debido a la nueva implementación del sistema, cambiando el esquema de servir a los pasajeros en cada punto en que éstos lo desearan.

- *Nivel de ocupación del bus.* Hace referencia a la presencia o no de pasajeros de pie en el pasillo, factor que contribuye a que los tiempos de ascenso y descenso sean más altos, dada la dificultad de movilidad en el interior del bus.
- *Método de pago.* Consiste en el medio utilizado para acceder al bus. En la ciudad de Bogotá, el esquema cambió de pago en efectivo a pago con tarjeta.
- *Configuración del bus.* Características relacionadas con el vehículo, como la disposición de las puertas, el ancho y número de éstas, el nivel de plataforma, etc.

Los tiempos de ascenso y descenso se tomaron en los corredores viales mencionados, discriminando los vehículos en los del TPC y en busetón o padrón (80 pasajeros), microbús (19 pasajeros) y bus (50 pasajeros) para los servicios del denominado SITP.

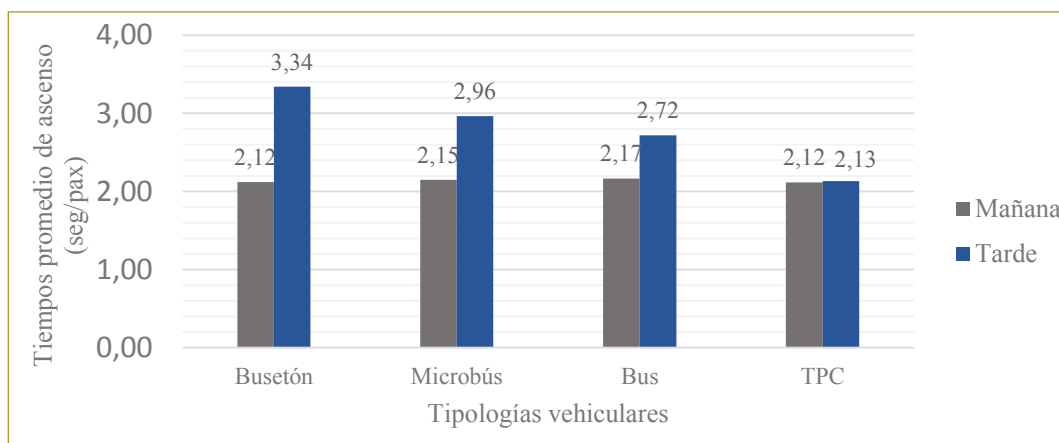
Las cifras de la tasa de ascenso mostraron que los tiempos en los servicios del SITP fueron mayores en horas de la tarde que en la mañana, debido principalmente a una mayor ocupación vehicular, tal como pudo registrarse en campo. Además, se observa que los tiempos en el SITP resultaron superiores al del TPC, así: 3,01 s/pax frente a 2,13 s/pax en horas de la tarde, y una diferencia casi despreciable de 2,15 s/pax frente a 2,12 s/pax en horas de la mañana (figura 1), confirmando la hipótesis planteada.

Sin duda alguna, el incremento en los tiempos de ascenso de los pasajeros bajo el escenario SITP ocasiona que los tiempos de permanencia en parada se

incrementen respecto a los registrados en el sistema tradicional. Sin embargo, en el desarrollo del estudio se pudo observar que existe un factor adicional que hace que dichos tiempos en el nuevo sistema de transporte sean mayores y se refiere a que debido a las condiciones de seguridad que se busca ofrecer con el SITP, los conductores tienen prohibido circular con las puertas abiertas, comportamiento que no es frecuente en las operaciones del TPC, pues suelen circular con la puerta abierta para agilizar el tiempo de parada, so pena del riesgo de accidente para los pasajeros. Este hecho se registró en el 95 % de las operaciones registradas en campo. Por tanto, el cumplimiento de este parámetro básico de seguridad aumenta lógicamente el tiempo de parada por el procedimiento de apertura y cierre de la puerta delantera, que es la que afecta el ascenso de pasajeros.

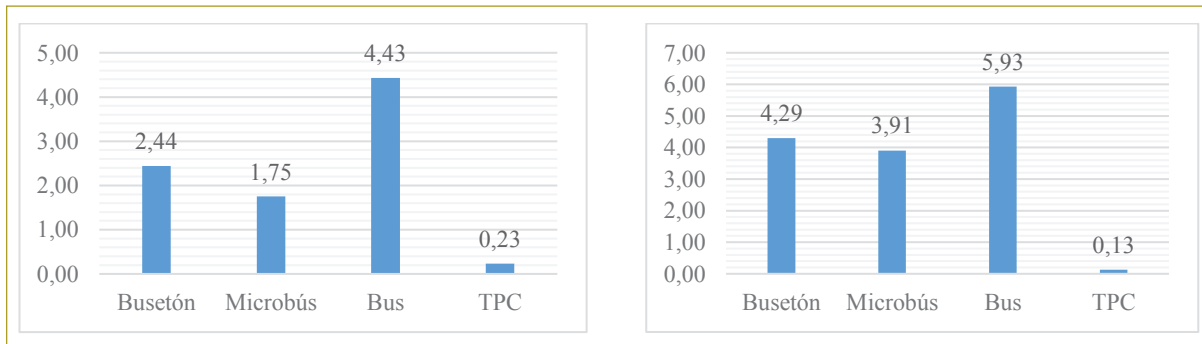
Los datos de estas operaciones resultaron con valores promedio de 2,88 s para apertura de puertas en el SITP frente a 0,23 s promedio en el TPC. En el caso del cierre de puerta, los valores promedio son 4,71 s para el SITP frente a 0,13 en el TPC (figura 2).

En el caso de la operación de apertura y cierre en la puerta trasera, no hay gran diferencia con la operación de la puerta delantera. En el primer caso, el tiempo promedio es de 2,16 s en el SITP para la apertura de puerta frente a 0,68 del TPC, y de 5,23 s para el cierre de puerta en el SITP frente a 3,02 s en el TPC. Cabe recordar que en el caso de la puerta trasera no se incluye el microbús, por cuanto sólo opera con puerta delantera



Fuente: Los autores.

Figura 1. Tiempos de ascenso promedio por pasajero, registrados en hora punta de la mañana y de la tarde. Bogotá, D.C., 2015.



Fuente: Los autores.

Figura 2. Tiempos de apertura (izquierda) y de cierre (derecha) de puerta delantera en paradero. Bogotá, D.C., 2015.

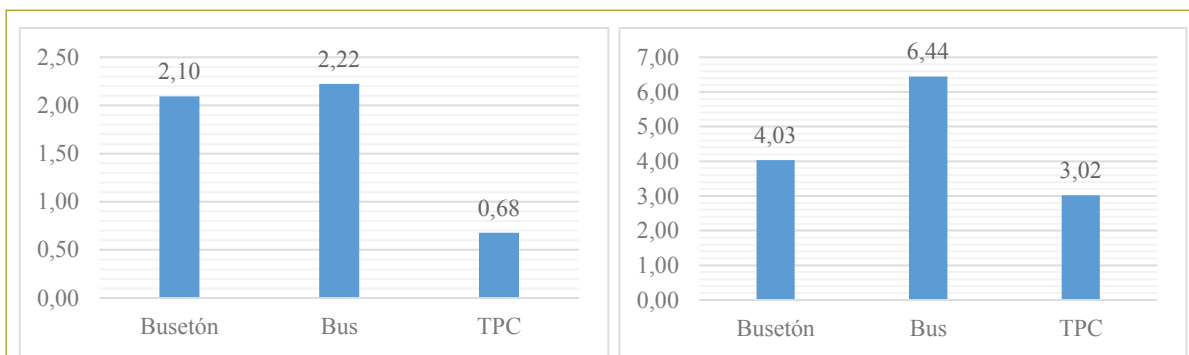
(figura 3). Esta última información da claridad a parte de por qué los tiempos en parada del TPC son menores que el nuevo y necesario sistema organizado SITP.

Teniendo como primera conclusión que los tiempos de parada en el escenario SITP son mayores que en el escenario TPC, se plantean como alternativas de mejora algunas medidas que, de ser implementadas, podrían reducir los tiempos, buscando con esto influir en los tiempos totales de desplazamiento y mejorar la percepción de los usuarios sobre el sistema. Para esto, tomando como base algunas investigaciones previas que otorgan tiempos de ascenso y descenso para determinadas condiciones, se generaron tres escenarios con el objeto de comparar los tiempos de permanencia entre la situación actual (escenario 1) y los cambios que se describen a continuación:

1. Pagar fuera del vehículo (escenario 2). La menor diferencia de altura entre el andén y el escalón del bus facilita el ascenso y descenso de pasajeros.

2. Pagar fuera del vehículo y operar con buses con plataforma baja (escenario 3). En este caso, el no tener que pagar dentro del vehículo disminuye el tiempo de ingreso al automotor, a lo que se suma el tiempo ahorrado por la facilidad de acceso que da la cercanía del escalón y el andén.
3. Pagar fuera del vehículo y operar con buses de puerta ancha (escenario 4). De manera similar al escenario anterior, el pago antes de subirse al bus y por tanto la no existencia de torniquete agilizan el ingreso, y las puertas anchas permiten que más de una persona suba o baje simultáneamente.

En el caso del escenario actual (escenario 1), la obligación de pasar por el torniquete aumenta el tiempo de ascenso, sumado a otros hechos observados en campo, como la pregunta del usuario al conductor para estimar la conveniencia de la ruta en su viaje o la búsqueda de la tarjeta de acceso en el momento justo del proceso de ascenso al bus; esto hace que el caso SITP tenga tiem-



Fuente: Los autores.

Figura 3. Tiempos de apertura (izquierda) y de cierre (derecha) de puerta trasera en paradero. Bogotá, D.C., 2015.

pos de abordaje comparativamente altos. Tales hechos observados tienen como posible causa el que el SITP estaba implementado en ese momento en un 60 % y gran parte de la ciudadanía se estaba adaptando tanto a la información referente a las rutas como al sistema de acceso con tarjeta en este servicio.

Para determinar los tiempos de parada, varios autores en distintas partes del mundo han definido modelos adecuados a cada situación; algunos que resultan muy generales, como es el caso del *High Capacity Manual*, y otros más específicos para las características del servicio que se presta. Luego de la revisión bibliográfica, se decidió que el caso del SITP en Bogotá (escenario 1) tiene mayor correspondencia con la ecuación 1 [12], empleada para los tiempos totales de parada en el escenario 1:

$$d = c + \max\left(\sum_{i=1}^A t_i^a, \sum_{j=1}^B t_j^b\right) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

d = tiempo de permanencia en parada.

C = tiempos muertos (apertura y cierre de puertas).

t^a = tiempo de ascenso de todos los pasajeros en parada.

t^b = tiempo de descenso o bajada de todos los pasajeros en parada.

Los tiempos en paradero se analizaron para cinco paraderos continuos del SITP, ubicados a lo largo de la calle 72, entre carreras 68G y 74A. El comportamiento del tránsito en el corredor vial se simuló en PTV Vissim 7.0, empleando información suministrada por la Secretaría Distrital de Movilidad para lograr una influencia real alrededor de los buses en el corredor y

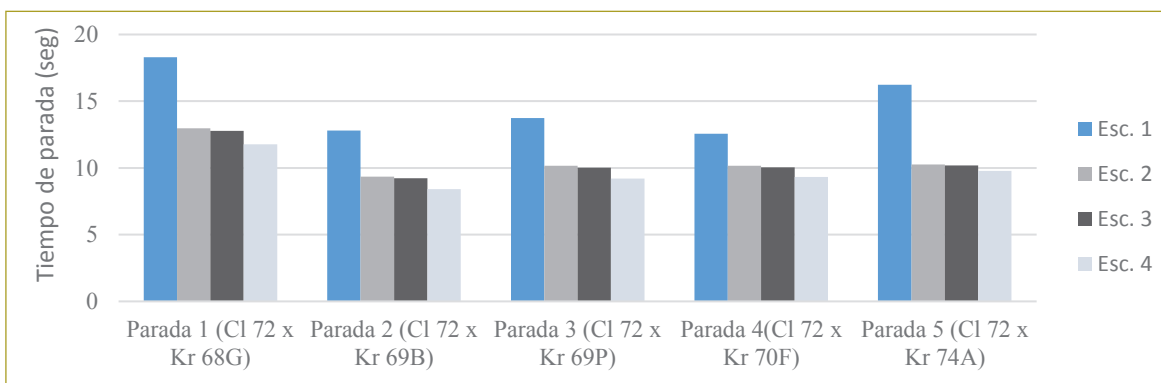


Fuente: Los autores.

Figura 4. Imagen de la simulación del corredor calle 72 en PTV Vissim 7.0.

en cada paradero (figura 4). Los cuatro escenarios se diferencian por los tiempos de parada, alimentados, como ya se mencionó, por el estudio de campo que compete a esta investigación, y por tiempos obtenidos de la bibliografía (figura 5).

Como puede observarse en la figura siguiente (figura 5), el caso actual de Bogotá con el SITP resultó ser el de mayor tiempo en parada (con registros cercanos a los 15 s), mientras que la implementación de puertas anchas en los buses fue la de mejor resultado con menores tiempo en parada (cercanos a los 10 s). Por otro lado, el tiempo correspondiente a los casos con pago anticipado fuera del bus no logró reducciones como la puerta ancha, pero definitivamente las tres opciones: pago anticipado fuera del bus (situación que eliminaría



Fuente: Los autores.

Figura 5. Tiempos de parada (s) en cinco paraderos en la calle 72, en cuatro escenarios de operación de acceso al bus. Bogotá, D.C., 2015.

el paso por el torniquete en el ingreso al vehículo, pero requeriría un ancho efectivo de andén que no obstruyera el paso peatonal que no sea usuario del servicio), puertas anchas en el bus y buses con plataforma baja, mejorarían notablemente los tiempos de parada y, por tanto, contribuiría a mejores tiempos de recorrido.

CONCLUSIONES

El anterior estudio desarrollado permitió demostrar que con la implementación del nuevo método de acceso a los vehículos del sistema de transporte público de Bogotá, los vehículos invierten más tiempo en el servicio a los usuarios en paraderos en comparación con los tiempos invertidos por el sistema tradicional, destacando que las cifras mostradas anteriormente podrán ser mayores una vez que el sistema esté implementado en su totalidad, puesto que el número de usuarios que se atenderán será mayor. Por ello se propone la aplicación de medidas tendientes a mejorar la operación en parada, las cuales pueden llegar a reducir hasta en un 50 % estos tiempos.

Dadas las ventajas que representa la implementación del SITP en Bogotá (integración tarifaria, paraderos establecidos y protección al medio ambiente, entre otras), se propone contrarrestar el efecto generado en las paradas, especialmente en aquellas de alta demanda, lo cual traería consigo una mejora en la percepción del sistema y en los tiempos totales de ruta.

Es importante aclarar que, aunque se está haciendo énfasis en que el cambio de sistema en Bogotá implicó mayores tiempos de operación en parada, los autores consideran que el cambio es positivo y que debió realizarse desde tiempo atrás; no obstante, estas conclusiones apuntan a la necesidad de compensar tal mayor tiempo con soluciones alternativas que faciliten el ascenso y descenso de pasajeros de los buses, reduciendo así los tiempos en parada. Estas conclusiones son

claves por cuanto se espera que muchas otras ciudades colombianas inicien la transformación de sus actuales sistemas de transporte a condiciones más seguras y eficientes, con medidas como el respeto al uso exclusivo de paraderos designados y la implementación del pago de pasajes por medios de validación electrónicos, como la tarjeta prepagada, con el fin de que cuenten con un estudio de caso colombiano que facilite la toma de decisiones para la planeación de su infraestructura de transporte público, en pro de una movilidad sostenible.

REFERENCIAS

- [1] Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. (2006). *Formulación del Plan Maestro de Movilidad para Bogotá, D.C.*
- [2] Empresa de Transporte del Tercer Milenio, Transmilenio S.A. (2013). *Historia de Transmilenio*. Disponible en <http://www.transmilenio.gov.co/es/articulos/historia>. Revisado en junio de 2016.
- [3] Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría de Tránsito y Transporte (2009). Decreto 309 de 2009.
- [4] Urazán, C., Velandia, E. & Sánchez, E. (2012). Consideraciones a la Implementación de paraderos obligatorios para el transporte público colectivo en Bogotá. *Revista Tecnura*, vol. 16, pp. 152-162.
- [5] Cámara de Comercio de Bogotá (CCB) (2015). Observatorio de movilidad. Reporte anual de movilidad 2014.
- [6] Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) (2012). Encuesta de Movilidad Distrital del año 2011. Bogotá, Colombia.
- [7] Secretaría Distrital de Movilidad (SDM), 2015. Encuesta de Movilidad Distrital del año 2015. Bogotá, Colombia.
- [8] Urazán, C. & Velandia, E. (2012). Consideraciones sobre el esquema del Sistema Integrado de Transporte Público para Bogotá. *Revista Épsilon*, vol. 18, pp. 105-121.
- [9] Urazán, C., Velandia, E. & Guzmán, J. (2012). Ascenso y descenso de pasajeros de transporte público colectivo. *Revista Épsilon*, vol. 18, pp. 31-44.
- [10] Rabban, S. (s.f.). Different Payment Methods Impact on Transit Speed and Performance. *Transportation Economics CE 8214*.
- [11] Tirachini, A. (2013). Bus Dwell Time: The Effect of different fare collection systems, bus floor level and age of passengers. *Transportmetrica A: Transport Science*.
- [12] Zhang, C. & Teng, J. (2013). Bus Dwell Time Estimation and Prediction: A Study Case in Shanghai – China. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*.
- [13] Transportation Research Board (TRB) (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.

Planta de tratamiento de agua potable del municipio de Barbosa (Santander)

Water treatment plant of the municipality of Barbosa (Santander)

RAFAEL YAMID QUINTERO SÁNCHEZ¹ - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

1. Ingeniero civil de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil. MEEE. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

rafael.quintero@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 18/03/2016 Aceptado: 27/06/2016

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

Resumen

La PTAP de Barbosa tiene capacidad de tratar 120 L/s. En este artículo se confrontan los parámetros de diseño y operación con la normativa vigente, y se determina su conformidad con los parámetros de funcionamiento y las características de calidad de agua tratada.

Palabras claves: evaluación operacional, planta de tratamiento, dosis óptima, pautas de operación.

Abstract

Barbosa's WTP has the capacity to treat 120 l/s. In this article, the design and operational criteria are compared with current regulations and it is established that the treatment plant meets the operational parameters and the characteristics of water quality required.

Keywords: operational evaluation, drinking water treatment plant, optimal dose, operation standards.

INTRODUCCIÓN

El municipio de Barbosa (Santander) cuenta con una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), de tipo convencional, construida en el año 1970 por el Instituto Nacional de Fomento Municipal (Insfopal), para un caudal de 50 L/s; posteriormente, en 1987 se amplió para contar en la actualidad con una capacidad de 120 L/s.

En este artículo se presentan los resultados de la evaluación operacional de la PTAP, con base en los parámetros de operación establecidos en el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000) y las características del agua potable establecidas en la Resolución 2115 de 2007.

INFORMACIÓN GENERAL

El municipio de Barbosa está localizado en el extremo sur del departamento de Santander, a una distancia de la capital del país de 185 km; el casco urbano está ubicado sobre la margen izquierda del río Suárez, a una altura aproximada de 1570 msnm, y tiene una temperatura media de 23 °C. La población se distribuye 80 % en el casco urbano y el 20 % restante en la zona rural; la economía del municipio se caracteriza por el comercio minorista con un 62 %, la venta de servicios 18 % y la industria manufacturera del sector secundario 12 %; el promedio de empleados ocupados por establecimiento es de dos personas.

Normativa aplicable

- Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000), título C, Sistemas de potabilización de agua.
- Resolución 2320 de 2009. Dotación neta máxima y periodo de diseño.
- Decreto 1575 de 2007. Calidad del agua para el consumo humano.
- Resolución 2115 de 2007. Calidad del agua para el consumo humano.

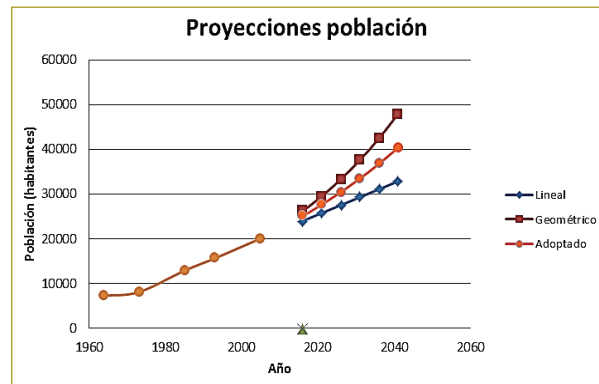
RESULTADOS

Proyección de la población y determinación de las necesidades de agua potable

La estimación se hace a partir de la información del número de habitantes de los censos realizados a escala nacional, específicamente de la zona urbana, que es abastecida por la planta de potabilización de agua del municipio.

Proyecciones de población

Método	2016	2021	2026	2031	2036	2041
Lineal	24.025	25.796	27.568	29.339	31.110	32.882
Geométrico	26.216	29.571	33.364	37.650	42.497	47.978
Adoptado	25.121	27.684	30.466	33.495	36.804	40.430



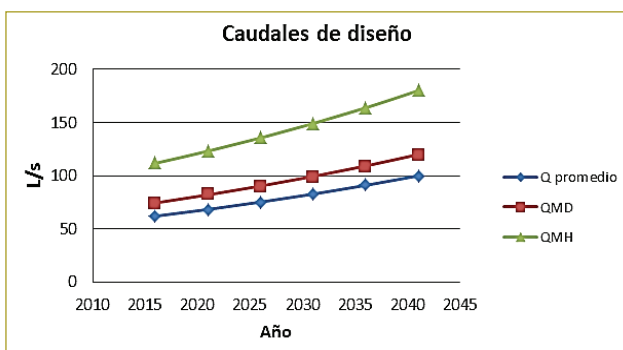
De acuerdo con los requerimientos del numeral B.2.2.5. RAS 2000, se hace necesario el ajuste de la población efectiva con la población flotante y migratoria, esta información se toma del Inventario Turístico del Municipio, realizado en el año 2010, donde se registra que Barbosa ocupa el puesto número 44 entre los municipios con mayor población flotante del país con 6000 habitantes por día para 2010; esto representa el 28 % de la población.

Proyección de población total

Año	Población (hab)	Población flotante (hab)	Población total (hab)
2016	25.121	7.033	32.154
2021	27.684	7.751	35.435
2026	30.466	8.530	38.996
2031	33.495	9.378	42.873
2036	36.804	10.304	47.108
2041	40.430	11.320	51.752

Proyecciones de caudales de diseño

Caudales de diseño							
Año	Población (hab.)	Dotación neta (L/hab.día)	Q promedio	k1	QMD (L/s)	k2	QMH (L/s)
2016	32154	167	62,15	1,2	75	1,5	112
2021	35435	167	68,49	1,2	82	1,5	123
2026	38996	167	75,37	1,2	90	1,5	136
2031	42873	167	82,87	1,2	99	1,5	149
2036	47108	167	91,05	1,2	109	1,5	164
2041	51750	167	100,03	1,2	120	1,5	180



Proyección de caudal de diseño.

Según lo anterior, la planta estará en capacidad de tratar el agua requerida por el municipio, de acuerdo con la proyección de la población hasta el año 2041, pues requiere un almacenamiento para regulación de 1773,5 m³ y de 360 m³ en caso de incendio, para un total de 2133,5 m³; en la actualidad, la capacidad de almacenamiento instalada es de 2160 m³.

Diagnóstico y evaluación de la planta de tratamiento



Vista general de la planta de tratamiento.

La información que se presenta se recopiló de los archivos de la Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios de Barbosa (Esbarbosa ESP) y por mediciones realizadas como parte de la evaluación.

La planta de tratamiento de agua potable del municipio de Barbosa la diseñó y construyó el Instituto Nacional de Fomento Municipal (Insfopal) en 1970 para un caudal de 50 L/s; posteriormente, en el año 1987, se amplió. En la actualidad tiene una capacidad de 120 L/s. La planta es de tipo convencional, con procesos de mezcla rápida (coagulante), floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

El diagnóstico se hace con base en la adaptación del título C del RAS 2000 del libro *Purificación del agua*.

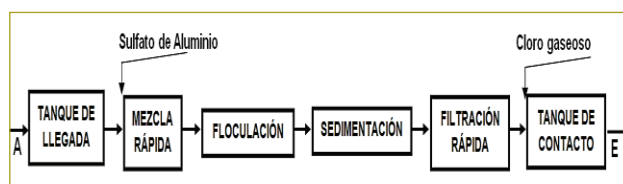


Diagrama de flujo PTAP Barbosa.

Canaleta Parshall

Diagnóstico de canaleta Parshall

Parámetro	Referencia	Calculados	Diagnóstico
Rango como aforador 9"	2,58 a 252, 0 L/s	120 L/s	Cumple
Gradiente de velocidad	> 1000s ⁻¹	1908 s ⁻¹	Cumple
Altura del agua (Ha) / Ancho de canaleta (W)	0,4 a 0,8	1,66	No cumple
Velocidad mínima en la garganta	2 m/s	1,88 m/s	No cumple
Velocidad mínima del efluente	0,75 m/s	1,28 m/s	Cumple
Número de Froude	1,7 a 2,5 o 4,5 a 9,0	1,25	No cumple

Para un ancho de garganta de 9" y caudal de diseño de 120 L/s: ha = 0,388 m, altura de la lámina de agua, K = 0,535, n = 1,530, la canaleta Parshall satisface los requerimientos de aforo. Sin embargo, no cumple con los criterios del RAS 2000 para velocidad mínima en la garganta y para número de Froude, pero satisface el criterio básico de gradiente para mezcla rápida (G>1000 s⁻¹).

Diagnóstico de floculador hidráulico

Parámetro	Referencia	Calculados		Diagnóstico
		Floculador 1	Floculador 2	
Velocidad del agua	0,2 a 0,6 m/s	0,24 a 0,36 m/s	0,13 a 0,2 m/s	Cumple 1
Tiempo de retención	20 a 30 min	22 min	41 min	Cumple 2
Gradiente de velocidad	20 a 70 s ⁻¹	70,82 - 141,33 s ⁻¹	24,15 - 54,65 s ⁻¹	Cumple 2
Gradiente de velocidad unidades de paso floculadores	<20 s ⁻¹	Sección 1 96,32 s ⁻¹	Sección 2 3,18 s ⁻¹	Cumple 2

Floculador hidráulico

La planta tiene dos floculadores hidráulicos de flujo horizontal, construidos en concreto; cada uno tiene tres cámaras de floculación, con tabiques de 5 cm de espesor y pendiente de fondo 2,5 %. Los dos floculadores presentan características de funcionamiento diferentes, debido a la variación en sus dimensiones.

El floculador 1, construido por el Insfopal en 1970, tiene anchos de canal inferiores al recomendado por este instituto de 0,45 m y distancia entre tabiques y pared del floculador cercana a 1,5 el ancho del canal, valor recomendado por varios autores. La velocidad de flujo en las tres cámaras cumple los rangos de referencia, pero sólo el gradiente de velocidad de la cámara 3 está dentro del rango de referencia. Sin embargo, el funcionamiento del floculador y la formación de floc son aceptables.

El floculador 2 también tiene ancho de canal inferior al 0,45 m, los gradientes de velocidad en las tres cámaras están dentro de los rangos de referencia, presenta acumulación de lodo en las curvas debido a las velocidades de flujo y posee separación entre los tabiques y la pared del floculador mayor de 1,5 el ancho del canal. Al igual que en el floculador 1, la formación de floc es aceptable.

Las aguas floculadas de las dos estructuras confluyen en un canal de 0,21 m² de área transversal y 3 metros de longitud, en el cual la velocidad de flujo aumenta a 0,57 m/s, duplicando la de la última cámara del floculador 1 y triplicando la de la última cámara del floculador 2, con un gradiente de velocidad superior al valor de referencia. El brusco incremento en la velocidad provoca rompimiento del floc.

Sedimentador

La planta cuenta con dos sedimentadores de alta tasa, con placas inclinadas (60°) de asbesto-cemento, cada unidad con capacidad de 60 L/s.

Diagnóstico de sedimentador

Parámetro	Referencia	Calculados	Diagnóstico
Placa angosta	1,2 x 2,4 m	1,2 x 1,7 m	Cumple
Tiempo de retención	10 a 15 min	10,91 min	Cumple
Profundidad	4 a 5,5 m	3 m	No cumple
Inclinación de placas	55 a 60°	60°	Cumple
Distancia entre placas	5 cm	8 cm	No cumple
Espesor de placas de asbesto-cemento	8 a 10 mm	10 mm	Cumple
Número de unidades	>2	2	No cumple
Carga superficial	120 a 185 m/d	132 m/d	Cumple
Sistema de salida	Tirante de agua ≥ 8 cm	8 cm	Cumple
Número de Reynolds	< 500 preferible <250	141,19	Cumple
Extracción de lodos	Continua	Continua	Cumple
Distancia entre tolva de lodos y placas	≥ 2 m	1,3 m	No cumple
Tasa de rebose	1,7 a 3,3 L/s*m	1,31 L/s*m	Cumple
Borde libre de canaletas de rebose	≥ 0,1 m	0,3 m	Cumple
Tirante de agua de canaletas de rebose	≥ 8 cm	12 cm	Cumple
Pendiente hacia la tolva	≥ 5 %	4 %	No cumple
Altura de lodos	Para 60 días almacena	10 días	No cumple
Tiempo de vaciado	< 6 h	4 h	Cumple
Periodo de evacuación	15 d a 2 meses	15 d	Cumple

Las unidades de sedimentación cumplen con los criterios básicos de diseño y el funcionamiento de las unidades es aceptable. Es recomendable la tercera unidad, pues cuando es necesario realizar el lavado de una de las unidades de sedimentación se debe regular el caudal de entrada a la mitad de la capacidad de la planta.

Filtros

La planta cuenta con una batería de tres filtros rápidos de flujo descendente por gravedad, con un medio dual de antracita (40 cm de espesor) y arena (30 cm de espesor), y soportado sobre un lecho de grava de 35 cm.

Diagnóstico de filtros

Parámetros	Referencia		Calculados		Diagnóstico
	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	
Turbiedad	< 8 UNT	< 2 UNT	3,47 UNT	0,03 UNT	Cumple
Color	< 20 UC	> 15 UC	16,7 UC	0,61 UC	Cumple
Tasa de filtración	300 m/d		320 m/d		Cumple
Pérdida de carga disponible	> 2 m		2,35		Cumple
Altura del agua sobre el lecho	> 0,5 m		0,7 m		Cumple
Número de filtros	> 3		3		No cumple
Espesor de lecho filtrante	> 0,6 m		0,7 m		Cumple

El retrolavado de cada filtro, por lo regular, se realiza para 36 horas de carrera y el lavado general se efectúa cada 15 días. El cálculo de la tasa filtrante se hace para dos unidades de filtración en funcionamiento. El funcionamiento de los filtros es bueno, operan con tasas de filtración adecuadas y remueven lo exigido en turbiedad y color.

Eficiencia en la remoción de turbiedad y color

Para el cálculo de eficiencias, se toman los promedios de los dos parámetros para el año de análisis de la planta.

Eficiencia en remoción de turbiedad y color

Eficiencia en remoción de turbiedad y color por procesos							
Parámetro	Cruda	Floculada	Eficiencia	Sedimentada	Eficiencia	Filtrada	Eficiencia total
Turbiedad	75,35	50,15	33,45 %	3,47	93,07 %	0,03	99,10 %
Color	500,82	417,28	16,68 %	19,71	95,28 %	0,61	99,88 %

Eficiencia en la remoción de turbiedad y color

Se utiliza un clorador de tipo solución al vacío, un inyector independiente y un cilindro de 68 kg de cloro gaseoso (Cl₂); la mezcla es aplicada a la salida del tanque de aguas filtradas, donde se asegura una mezcla óptima y un máximo tiempo de contacto.

Diagnóstico de cloración

Parámetro	Referencia	Calculados	Diagnóstico
Dosis	Ct=50 mg*min/L	50 mg*min/L	Cumple
Número de cloradores	>2	1	No cumple
Residual de cloro libre	0,2 a 1,0 mg/L (extremo de la red)	1,7 (salida de planta)	Cumple
Tasa máxima de extracción de cloro (cilindro de 68 kg)	16 kg/d	15,5 kg/d	Cumple

El sistema de cloración funciona, pero no se cuenta con un segundo clorador para los casos de emergencia o de mantenimiento; además, el sistema de cloración carece de báscula para determinar las tasas de extracción y la correcta dosificación del desinfectante.

Calidad del agua

Caracterización de las fuentes

La planta de tratamiento se abastece de tres fuentes: la quebrada Semisa, que suministra un caudal aproximado de 80 L/s durante la mayoría del año; el río Suárez y un pozo profundo, que suministran caudales de 50 L/s y 10 L/s, respectivamente, pero sólo en las épocas de verano.

Caracterización de las fuentes

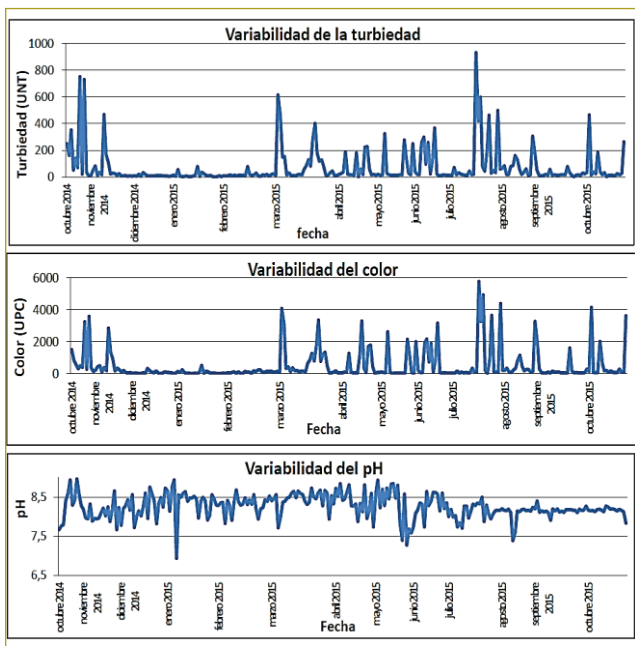
Parámetro	Quebrada Semisa	Río Suárez	Pozo profundo
Color verdadero (UPC)	855	3518	0
Turbiedad (UNT)	156,6	490,2	0
pH	8,18	8,53	8,22
Temperatura (°C)	20,26	20,7	20,33
Calcio (mg/L)	50,51	52,13	39,6
Alcalinidad total (mg/L)	66	105,7	108,3
Cloruro (mg/L)	60	76,67	58,33
Dureza total (mg/L)	262	136	136
Hierro total (mg/L)	1,8	2,217	0,153
Sulfatos (mg/L)	61,4	68,33	8,333
Fosfatos (mg/L)	12,96	6,25	1,44
Nitratos (mg/L)	33,06	77,84	7,4
Aluminio (mg/L)	0,02	0	0
Coliformes totales (UFC/100 cm ³)	>100	>100	>100
<i>Escherichi coli</i> (UFC/100 cm ³)	>100	>100	>100

De acuerdo con la tabla C.2.1 del RAS 2000 y con la caracterización de las fuentes se determina la calidad de las fuentes y el grado de tratamiento requerido. Debido a que la fuente principal es la quebrada Semisa, la PTAP incluye un tratamiento convencional de coagulación, floculación, sedimentación, filtración rápida y desinfección.

Variabilidad en la calidad del agua cruda

Se recopilan los resultados de laboratorio de un año de funcionamiento de la planta (257 muestras), que incluyen las dos temporadas de lluvia (marzo a mayo y septiembre a noviembre) y las dos temporadas secas (junio a agosto y diciembre a febrero), predominantes en la climatología del municipio.

El agua presenta turbiedades que oscilan entre 0 y 1000 UNT, el color varía entre 1 y 5800 UPC y el pH fluctúa entre 7 y 9, a temperaturas que van de 14 a 30 °C.



Variabilidad en la calidad del agua cruda

Caracterización de las fuentes

Los valores máximos, mínimos y promedio de los parámetros (46 muestras) que registró la empresa durante un año son los siguientes:

Caracterización del agua tratada

Parámetro	Mínimo	Máximo	Promedio	Norma
Color verdadero (UPC)	0	12	0,89	15
Turbiedad (UNT)	0	0,66	0,04	2
pH	7,08	8,5	7,58	6,5-9
Temperatura (°C)	18,6	28,8	20,65	-
Cloro residual/mg/L)	1,02	2	1,69	0,3-2,0
Calcio (mg/L)	36	58,14	48,05	60
Alcalinidad total (mg/L)	35	142	85,76	200
Cloruro (mg/L)	40	155	65,87	250
Dureza total (mg/L)	98	196	144,83	300
Hierro total (mg/L)	0,03	0,12	0,08	0,3
Sulfatos (mg/L)	16	82	45,89	250
Fosfatos (mg/L)	0,33	53,97	7,17	0,5
Nitratos (mg/L)	0,6	9,01	4,91	10
Aluminio (mg/L)	0	0,05	0,03	0,2
Coliformes totales (UFC/100 cm³)	0	0	0,00	0
Escherichi coli (UFC/100 cm³)	0	0	0,00	0

El agua producida cumple con la norma colombiana (Resolución 2115 de 2007) para características de agua potable.

Evaluación operacional

Costos de producción

Los costos de potabilización corresponden al año 2015 (\$443.569.698) y se toman del balance de comprobación. Con base en el total de costos calculado, se puede determinar el costo de potabilización por metro cúbico tratado y por metro cúbico facturado.

Costo por metro cúbico tratado y facturado

Unidad de análisis	Cantidad en un año (2015)	Costos para un año de tratamiento	Valor por unidad
Metro cúbico tratado	1.959.962	\$443.569.698	\$226,32
Metro cúbico facturado	1.228.800	\$443.569.698	\$360,98

El costo de \$226 por metro cúbico tratado en la PTAP de Barbosa es bajo, si se compara con los \$456 de la PTAP de Monquirá (municipio aledaño, con características similares de dinámica poblacional y proceso de tratamiento).

El costo por metro cúbico facturado se incrementa a \$360 debido a que el sistema tiene un 38 % de pérdidas; al comparar este costo con la tarifa por metro cúbico consumido (\$310) se presenta un déficit aproximado de \$50 por metro cúbico, el cual se debe suplir con el valor del cargo fijo, al igual que los gastos administrativos, de aducción y distribución con sus respectivos mantenimientos y para inversión en infraestructura.

Comparación de tarifas por metro cúbico de agua

Ciudad o municipio	Valor metro cúbico (pesos)	Razón con respecto a Barbosa
Barbosa	\$310	1
San Gil	\$698	2,25
Socorro	\$716	2,31
Puente Nacional	\$741	2,39
Moniquirá	\$831	2,68
Chiquinquirá	\$1472	4,75
Bucaramanga (capital)	\$1553	5
Tunja (capital)	\$1658	5,35
Bogotá (capital)	\$2784	8,98

La tarifa establecida por metro cúbico consumido, fijada en el municipio de Barbosa, es baja si se compara con municipios cercanos de características similares que es más del doble, pero observa una diferencia mayor al comparar con ciudades capitales cercanas que llega hasta nueve veces el valor de la tarifa.

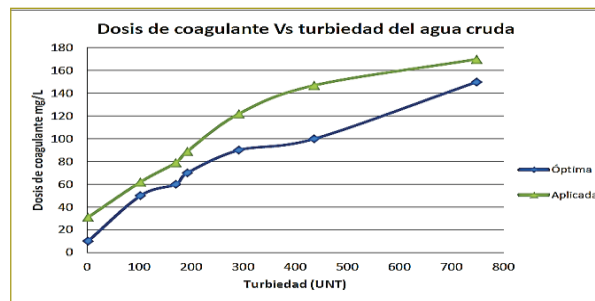
Alternativas para control operacional

Dosis óptima de coagulante

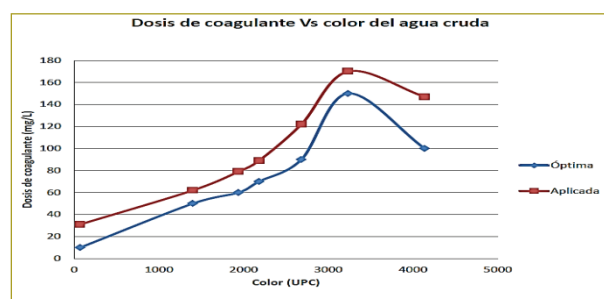
Para determinar la dosis óptima del coagulante utilizado en la planta, sulfato de aluminio tipo B, se consideran

las tres fuentes que abastecen la planta y las dos combinaciones que se realizan. Se hicieron siete ensayos de jarras hasta el proceso de sedimentación.

Se comparan los valores de las dosis óptimas determinadas en los ensayos de jarras y las dosis aplicadas en la planta, con respecto a la turbiedad y el color, respectivamente.



Dosis óptima y aplicada vs. turbiedad, quebrada Semisa - pozo profundo.



Dosis óptima y aplicada vs. color, quebrada Semisa - pozo profundo.

La dosis aplicada es mayor que la dosis óptima calculada, lo que genera sobrecostos. Sin embargo, la PPA con las dosis aplicadas cumple la norma para agua potable.

Ensayos de jarras en quebrada Semisa - pozo profundo

N.º de ensayo	Fecha	Turbiedad (UNT)		Color (UPC)		pH		Dosis óptima (mg/L)
		Inicial (cruda)	Final (sedimentada)	Inicial (cruda)	Final (sedimentada)	Inicial (cruda)	Final (sedimentada)	
1	2015/09/18	749	0	3232	18	8,30	7,52	150
2	2015/09/23	2,21	0	70	15	8,17	7,12	10
3	2015/10/23	292	0	2682	13	8,32	7,77	90
4	2015/10/30	437	0	4173	7	8,48	8,07	100
5	2015/11/05	171	0	1939	0	8,32	8,01	60
6	2015/11/06	103	0,47	1401	0	8,54	8,06	50
7	2015/11/09	193	0	2182	16	8,28	8,01	70

La segunda combinación de fuentes sólo se trata cuando el caudal de la quebrada Semisa disminuye, por lo cual se bombea agua del río Suárez con un caudal promedio de 50 L/s, generando la combinación río Suárez - quebrada Semisa - pozo profundo. La dosificación para la combinación anterior es similar a la de la combinación quebrada Semisa - pozo profundo, considerando que cuando se bombea el agua del río Suárez, las turbiedades son más altas.

Tomando como referencia el valor promedio de turbiedad para el año 2015 (72,63 UNT) y las dosis aplicada (53 mg/L o g/m³) y óptima (37 mg/L o g/m³), se determina la cantidad de coagulante consumido durante el año y el posible ahorro que se podría hacer:

- Consumo con dosis aplicada: 103.878 kg/año
- Consumo con dosis óptima: 72.518 kg/año
- Ahorro en un año: 31.359,39 kg (30,2 %)

Aunque la acumulación de lodo es pequeña, se debe diseñar y proveer un sistema de tratamiento y disposición de lodos para la PTAP. De la misma manera, se requiere evaluar el método de tratamiento o disposición de las aguas de lavado de filtros.

Mejoramiento de infraestructura

A continuación se presentan las operaciones requeridas para mejoramiento y mantenimiento de la planta de potabilización.

Mejoramiento de infraestructura

Instalación o elemento	Intervención necesaria
Instalaciones locativas	Hacer un mantenimiento general a las instalaciones locativas de la planta, así como estabilizar y confinar los muros divisorios que presentan dilataciones, enchapar los pisos y paredes. Adquirir la planta eléctrica para el funcionamiento de los equipos. Equipar el laboratorio de los operarios con los equipos necesarios para hacer mediciones de turbiedad, color, pH y cloro.
Caudímetro y canaleta Parshall	Calibrar el caudímetro y reemplazar su reglilla de medición, instalar la reglilla de medición en la canaleta Parshall como medio de verificación del funcionamiento del caudímetro.
Dosificador	Ubicar la tabla de homologación de unidades junto al tablero de dosificación. Instalar un sistema de dosificación diluida y por gravedad, para los casos de fallas en el fluido eléctrico o la planta eléctrica.
Floculadores	Prolongar 0,2 m los tabiques del floculador 2, de tal modo que queden a 0,4 m de las paredes del tanque, para evitar la acumulación de lodo. Ampliar a 0,6 m ² , la sección donde se encuentran las aguas de los dos floculadores para evitar el rompimiento del floc. Reconstruir los tabiques en la unidad de paso entre el floculador y el sedimentador con una separación de 0,8 m.
Sedimentadores	Reponer las placas de asbesto-cemento dañadas y reacomodar todo el sistema de placas de forma que queden paralelas, pues en la actualidad, en algunos sectores se encuentran amontonadas. Construcción del sedimentador 3.
Filtros	Realizar la reposición del medio filtrante para el filtro 3. Construcción del filtro 4.
Área de cloración	Cambiar el sistema de cloración a uno que cuente con más de dos cloradores y que utilice cilindro de una tonelada, que cumpla con la tasa máxima de extracción diaria cuando la planta opere con caudal de diseño (120 L/s). Instalar la báscula para en el sistema de cloración. Adquirir el equipo de seguridad industrial para el cambio de cilindro.
Válvulas, bombas y macromedidores	Hacer mantenimiento a las válvulas de la planta y pintarlas nuevamente, de acuerdo con el Manual de Procesos y Procedimientos de la Empresa. Reponer el sistema de macromedición en las conducciones que salen del tanque de contacto, para poder registrar la cantidad de agua tratada en la planta.
Laboratorio	Dotar el laboratorio con equipos e insumos necesarios para realizar los análisis fisicoquímicos y microbiológicos completos, de acuerdo con la Resolución 2115, al igual que para hacer el ensayo de jarras y recalibrar los equipos existentes.
Lodos	Dotar a la PTAP de un sistema apropiado de tratamiento y disposición de lodos y aguas de lavado de filtros.

Pautas de control de operación

Etapa	Actividad	Responsable	Frecuencia
Aforo y mezcla rápida	Registro del caudal de entrada y las fuentes que abastecen la planta.	Operario	1 hora
	Registro de la dosis de coagulante aplicada en mg/L.	Operario	3 horas
	Registro de existencias de sulfato y sulfato consumido en kg.	Operario	3 horas
Floculación	Ensayo de jarras.	Profesional Laboratorio	Diaria
Sedimentación	Lavado de sedimentadores y registro.	Operario	Ocasional
Filtración	Lavado de filtros y registro.	Operario	Diaria
Cloración	Registro de dosis aplicada y de cloro consumido.	Operario	1 hora
Suministro	Registrar las lecturas de macromedición para el agua suministrada a la red.	Operario	1 hora
	Determinar y registrar el volumen de agua suministrada a la red.	Operario	6 horas
Laboratorio	Realizar y registrar mediciones de turbiedad, color y pH para agua cruda, floculada, sedimentada y tratada.	Operario	3 horas
	Realizar y registrar la medición de cloro residual del agua tratada	Operario	1 hora
	Realizar y registrar análisis fisicoquímico completo del agua cruda y agua tratada.	Profesional laboratorio	1 día
	Realizar análisis microbiológico para el agua tratada.	Profesional laboratorio	1 semana (8 muestras)
Aseo de planta	Lavado y mantenimiento general de la planta.	Profesional laboratorio y operarios	Ocasional
Lodos	Registro de caudal.	Operario	Diaria

Pautas de control de operación

El profesional encargado del laboratorio y los operarios de la planta deben considerar las pautas de control de operación presentadas.

Propuesta de gestión***Indicadores de seguimiento en cada proceso y escala para valoración***

Para control de operación, se recomienda satisfacer los indicadores de seguimiento de cada proceso indicados a continuación.

Mecanismos de acción y mejoramiento

La Administración Municipal de Barbosa y la Gerencia de la Empresa de Servicios Públicos Domiciliarios de Barbosa (Esbarbosa ESP) deben trabajar mancomunadamente para gestionar ante los entes departamentales y nacionales los recursos necesarios para hacer las intervenciones propuestas para el mejoramiento y mantenimiento de la planta.

Se requiere que Esbarbosa ESP realice un detallado análisis de costos en el proceso de tratamiento del agua y de todo el sistema de acueducto, así como una proyección de inversión, para que pueda presentar una

propuesta de reajuste de la tarifa ante la CRA (Comisión de Regulación de Agua Potable) para el año 2017.

Así mismo, se debe garantizar la disponibilidad presupuestal para hacer periódicamente los mantenimientos preventivos en las instalaciones y equipos de la planta de tratamiento, al igual que los mantenimientos correctivos que se requieran y que estén enmarcados en las políticas de calidad de la empresa.

Es necesario que Esbarbosa ESP actualice la estratificación de los usuarios, ya que este proceso no se ha realizado desde el año 1998, lo que genera que varios usuarios, de acuerdo con el EOT vigente, se beneficien con subsidios en su tarifa a los cuales ya no tienen derecho.

CONCLUSIONES

- La población de Barbosa presenta un crecimiento continuo, que proyecta un incremento poblacional aproximado del 61 % para el periodo de análisis de 25 años.
- La PTAP se diseñó para un caudal de 120 L/s, suficiente para abastecer la población proyectada para el año 2041 (51.750 hab.).
- El sistema de acueducto cuenta con una capacidad de almacenamiento de 2160 m³, suficiente para operar con el QMD 2041, de 120 L/s.

Indicadores de seguimiento en cada proceso y escala para valoración

Proceso	Indicador de seguimiento	Escala de valoración
Aforo y mezcla rápida	Porcentaje de registros reales en un mes	Óptimo: > 90% Aceptable: entre 70 y 90 % Deficiente: < 70 %
Floculación	Número de ensayos de jarras en un mes	Óptimo: > 13 Aceptable: entre 10 y 13 Deficiente: < 10
Sedimentación	Número de lavadas de sedimentadores en un mes	Óptimo: > 3 Aceptable: entre 2 y 3 Deficiente: < 2
Filtración	Número de lavadas de filtros en un mes	Óptimo: > 50 Aceptable: entre 40 y 50 Deficiente: < 40
Cloración	Porcentaje de registros reales en un mes	Óptimo: > 90 % Aceptable: entre 70 y 90 % Deficiente: < 70 %
Suministro	Porcentaje de registros reales en un mes	Óptimo: > 90 % Aceptable: entre 70 y 90 % Deficiente: < 70 %
Laboratorio	Número de mediciones de turbiedad, color y pH para agua cruda, floculada, sedimentada y tratada en un mes	Óptimo: > 200 Aceptable: entre 160 y 200 Deficiente: < 160
	Número de mediciones de cloro residual en el agua tratada en un mes	Óptimo: > 600 Aceptable: entre 400 y 600 Deficiente: < 400
	Número de análisis fisicoquímico del agua cruda y tratada en un mes	Óptimo: > 25 Aceptable: entre 20 y 25 Deficiente: < 20
	Número de análisis microbiológicos para agua tratada en un mes	Óptimo: > 4 (8 muestras) Aceptable: entre 3 y 4 (8 muestras) Deficiente: < 3 (8 muestras)
Aseo de planta	Número de lavadas de planta en un año	Óptimo: > 5 Aceptable: entre 4 y 5 Deficiente: < 4

- La PTAP es de tipo convencional. Está conformada, por un tanque de llegada, una canaleta Pashall, dos floculadores hidráulicos de flujo horizontal, dos sedimentadores de alta tasa con placas inclinadas, tres filtros rápidos y un tanque de contacto para cloración.
- Los elementos del sistema de potabilización, funcionan apropiadamente.
- El agua cruda se caracteriza así: turbiedad entre 0 UNT y 1000 UNT, color entre 1 UPC y 5800 UPC, pH entre 7 y 9; temperatura de 14 °C a 30 °C.
- Para el año de análisis, la planta presenta eficiencias totales de 99,96 % en remoción de turbiedad y de 99,88 % en remoción de color.
- Para la dosificación de coagulante es necesario que los operadores del sistema realicen con la frecuencia requerida los ensayos de jarras.

REFERENCIAS

1. Quintero, R. (2016). Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Barbosa (Santander). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Alcaldía Municipal de Barbosa (2005). Esquema de ordenamiento territorial de Barbosa, 2005-2015.
3. Ministerio de Desarrollo Económico (2000). Resolución 1096. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2000.
4. Ministerio de Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial (2009). Resolución 2320. Por la cual se modifica parcialmente la Resolución 1096 de 2000.
5. Ministerio de la Protección Social (2007a). Decreto 1575. Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
6. Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007b). Resolución 2115. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano
7. Romero, J (2005). *Purificación del agua* (2.ª ed., 3.ª reimp.).

Uso y aplicación del prPEAD en la fabricación de elementos estructurales para construcción de vivienda en Colombia

Use and application of rpHDPE in structural elements manufacture for housing development in Colombia

JORGE ANDRÉS SIERRA JIMÉNEZ¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Ingeniero civil. Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.
2. Directora de tesis.

jasj20@gmail.com - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/04/2016 Aceptado: 12/07/2016

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

Resumen

Desde sus inicios, el plástico ha transformado la calidad de vida de la humanidad, pero la acumulación de residuos se ha convertido en una preocupación global, por lo que el reciclaje se ha convertido en la forma más rápida y fácil para contribuir a la sostenibilidad de los ecosistemas del mundo. Mediante esta investigación se estudia la factibilidad del uso de material plástico polietileno de alta densidad (PEAD) reciclado (prPEAD) en la fabricación de elementos estructurales (EE) para la construcción de vivienda en Colombia, al tiempo que se analiza una posible solución al déficit de accesibilidad a vivienda para personas de bajos recursos y en caso de emergencia, mediante la construcción rápida de viviendas sostenibles a base de prPEAD. Se estudian el material prPEAD tomando muestras de elementos tipo bloque Brickarp[®], elementos unitarios como columnas, vigas, bloques Brickarp[®] y muros ensamblados a escala real sometidos a ensayos de compresión, tensión, flexión, carga lateral horizontal, carga paralela al plano en muros y perpendicular al plano en muros, así como el comportamiento de una vivienda de 6,33 x 6,33 m fabricada con elementos de prPEAD y uniones pernadas con láminas metálicas sometida carga horizontal estática.

Palabras claves: plástico, reciclaje, polietileno de alta densidad, vivienda, sostenibilidad, elementos estructurales.

Abstract

Since the very beginning, plastics have transformed human life quality, but waste accumulation has become a global worry, which is why recycling is now the quickest and easiest way to promote the sustainability of ecosystems worldwide. This research studies the feasibility of the use of High-Density Polyethylene (HDPE) recycled plastics (rpHDPE) to manufacture structural elements (SE) for housing in Colombia, while also studying a solution for housing deficit accessibility for people with low economic resources and in case of emergency through the use of rpHDPE. rpHDPE material is studied using as a sample Brickarp[®] type blocks, unitary elements such as columns, beams, Brickarp[®] blocks, and assembled walls in real scale exposed to compression, tension, flexibility, lateral horizontal load, load parallel to the plane in walls and load perpendicular to the plane in walls, as well as the behavior of a 6.33 m x 6.33 m house manufactured with rpHDPE elements and bolted joints with metallic sheets under static horizontal load.

Keywords: plastic, recycling, high density polyethylene, housing, sustainability, structural elements.

INTRODUCCIÓN

Los primeros materiales con propiedades afines a las del plástico de nuestros días se fabricaron con pezuñas de animales, caparazones de tortugas y cuernos de animales(1). En 1860, el estadounidense John Hyatt fabricó un sustituto del marfil llamado “celuloide”, el cual fue el punto de partida a lo que hoy denominamos plástico(2). El plástico ha presentado un desarrollo tecnológico a escala mundial, el cual tiene millones de aplicaciones a la vida moderna y mejora la calidad de vida(1). “La producción global de plástico para 2014 fue aproximadamente de 311 millones de toneladas” (3). La producción ha aumentado en las últimas décadas en un 8,60 %, lo que desencadena una preocupación global por la disposición final de éstos y la afectación al medio ambiente(3).

Según datos del Sistema de Información y Reporte Empresarial (Sirem), de la Superintendencia de Sociedades, entre 2011 y 2012 las ventas de la industria del plástico en Colombia movieron en promedio US\$3491 millones, lo que significó un empuje en la economía nacional, con un crecimiento a una tasa anual del 6 % entre 2008 y 2012. Sin embargo, el consumo anual en Colombia es de 20 kg por habitante, a pesar de tener un nivel de consumo bajo frente a países desarrollados, donde el plástico ha sustituido diferentes materiales tradicionales, llevando a un uso intensificado sin un adecuado reciclaje, por lo que se ha convertido en una generación de desechos incontenibles (4), (5), (6). Por fortuna, países como Estados Unidos en 1990, China en 2008 e Italia en 2011 han tomado medidas legales para reducir el consumo y uso del plástico e incentivar el reciclaje.

Una de las mejores soluciones para mermar el impacto ambiental de la basura plástica es reciclando; “es también la mejor manera de reducir la extracción de materias primas”(7). Mediante esta investigación exploratoria se contribuye a la sostenibilidad al estudiar la factibilidad del empleo del prPEAD para fabricar EE para uso en vivienda; es un punto de partida para ayudar al planeta en la reutilización de materiales y a su vez se mejoran los ecosistemas, al disminuir su carga de residuos, también se aporta solución a la accesibilidad a vivienda en Colombia, principalmente en caso de desastres o emergencias.

DESCRIPCIÓN

Los elementos estudiados en esta investigación los proporcionó la Fundación Ficidad, entidad que financió parcialmente, entre 2013 y 2015, una investigación en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito para conocer las propiedades y comportamientos de diferentes elementos como bloques Brickarp® (bB®), y columnas y vigas compuestas exclusivamente con prPEAD (específicamente poliolefinas) y fabricados por medio de extrusión inyectada en moldes(12).

Brickarp® es un tipo de bloque fabricado con prPEAD, patentado (#566) por el inventor Fernando Llanos Gónima; el bB® forma parte de un tipo de sistema constructivo que, al ensamblarse con columnas y vigas de prPEAD, puede ser modulable y conformar una vivienda o refugio de 36 m².

La metodología de ensayos se realizó partiendo del estudio de probetas en forma de cubo extraídas de un elemento tipo bB®, sometidas a carga de compresión por cada sentido, continuando con el estudio de elementos como bB®, columnas, vigas, muretes y muros, hasta llegar al estudio de carga lateral estática de una estructura tipo vivienda a escala real, conformada por elementos fabricados con prPEAD.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Resistencia a la compresión

Muestras tipo cubos. Se estudiaron treinta muestras de 60 x 60 x 60 mm, diez para cada sentido de estudio; se ensayaron a compresión en una máquina universal UH-100A según la norma ISO 604. Las muestras se extrajeron de bB® por medio de corte y refrentadas, se enumeraron con el prefijo C seguido del número de lote y con el consecutivo de muestras, y se marcaron con números grandes 1, 2 y 3 que indicaban el sentido Y, X y Z, respectivamente. Las muestras arrojaron un valor característico de esfuerzo máximo a compresión de 4,65, 3,28 y 2,40 MPa para el sentido de estudio X, Y y Z, respectivamente, con coeficientes de variación de 40, 53 y 26 % para el sentido de estudio X, Y y Z. A continuación se muestra el análisis estadístico de los resultados de los ensayos (tabla 1).

Tabla 1 (a), (b), (c)
Resultados de ensayos a compresión en muestras tipo cubo en sentido X, Y y Z, y análisis estadístico

Valor	Esf. máx. (MPa)	Elasticidad (MPa)
Promedio	9,80	213,80
Desviación estándar	3,90	35,50
Coefficiente de variación	40 %	17 %
Valor característico	4,65	157

(a)

Valor	Esf. máx. (MPa)	Elasticidad (MPa)
Promedio	10,98	114,33
Desviación estándar	5,76	32,06
Coefficiente de variación	53 %	28 %
Valor característico	3,28	66

(b)

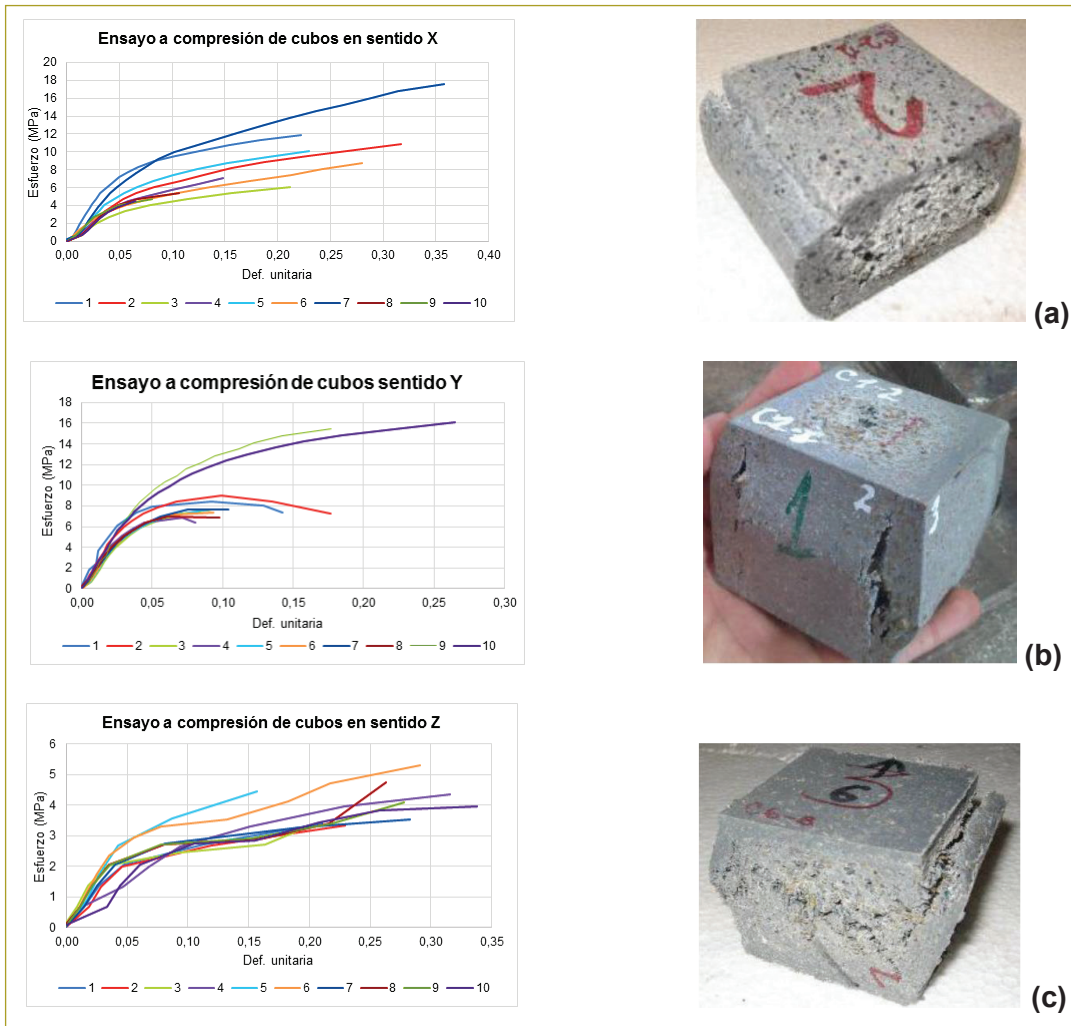
Valor	Esf. Máx. (MPa)	Elasticidad (MPa)
Promedio	4,16	52,89
Desviación estándar	1,06	10,32
Coefficiente de variación	25,5 %	19,5 %
Valor característico	2,40	33

(c)

A renglón seguido (figura 1 (a) (b) (c)) se muestran la falla típica y el comportamiento de las muestras sometidas a compresión en cada sentido de estudio.

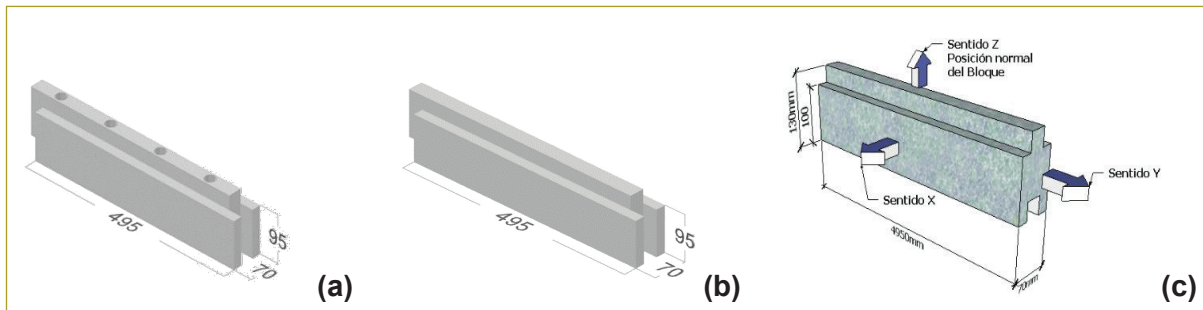
Al extraer las probetas se hallaron vacíos y poros de gran tamaño a lo largo del sentido Y en todas las muestras, y al obtener los resultados de los ensayos en

las diferentes direcciones de estudio se pudo comprobar que el material es anisótropo y heterogéneo. Según investigaciones de Nosker (1992) (9), Zarillo (1993) (10) y Breslin (1998) (11), cuando el plástico se calienta en la extrusora el agua se vaporiza, formando burbujas en la mezcla, y luego, cuando se enfría, la humedad vapo-



Fuente: El autor.

Figura 1 (a) (b) (c). Comportamiento de las muestras durante ensayo a compresión, y fallas típicas en los sentidos de estudio X, Y y Z.



Fuente: Ficidadet.

Figura 2 (a) bb® con agujeros; (b) bb® sin agujeros; (c) Sentidos de estudio en bb®.

Tabla 2

Resultados de ensayos a compresión en bloques Brickarp® en sentido Z y análisis estadístico

Muestra sin agujeros	
Valor	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)
Promedio	4,82
Desviación estándar	0,461
Coefficiente de variación	9,50 %
Valor característico	3,85

Muestra con agujeros	
Valor	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)
Promedio	6,6
Desviación estándar	1,757
Coefficiente de variación	26,50 %
Valor característico	3,15

rizada es atrapada dentro del elemento plástico, por lo que pueden producirse en el proceso de fabricación.

Bloque Brickarp®. Los bb® conforman los muros en la vivienda. Se estudiaron diez muestras, cinco con agujeros y cinco sin agujeros, ensayados a compresión mediante una máquina universal UH-100A en sentido de estudio en Z; las dimensiones del bloque son de 70 x 130 x 495 mm. La sección teórica se muestra en la figura anterior (figura 2). El valor característico de esfuerzo a la compresión en bloques sin agujero fue de 3,85 MPa y con agujeros de 3,15 MPa, con coeficientes de variación de 10 y 26 %, respectivamente. El análisis estadístico de los resultados de los ensayos se aprecia en la tabla pasada (tabla 2).

La falla típica fue por aplastamiento y se presentó una expansión lateral del material a partir de una altura promedio de 63 mm, medidos desde la base del bloque (figura 3).

Las muestras se ajustaron con elementos del mismo material cortados de otros bloques para aplicar la carga uniforme, por lo que durante el inicio del ensayo los datos pudieron ser variables debido al ajuste y acomodamiento de estos elementos.

Al comparar los resultados de valor característico de esfuerzo a compresión en bb® sin agujeros y pro-

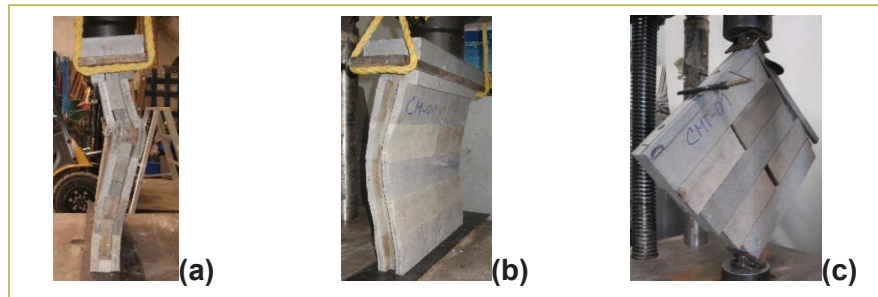


Fuente: El autor.

Figura 3. Falla típica de bloque Brickarp® en ensayo a compresión.

betas tipo cubo en sentido Y, se encontró similitud de resultados; sin embargo, la variabilidad en las probetas tipo cubo fue mayor. Se plantea la hipótesis de que al fabricar los bloques individuales el material cercano a la superficie del molde se enfría más rápido que el interior, lo que provoca vacíos internos; por lo tanto, al realizar el corte de los bloques los resultados varían, dependiendo de la zona donde se ubiquen los vacíos en el proceso de fabricación.

Muretes. Las dimensiones de los muretes son de 460 x 400 x 70 mm y están conformados por bb® acoplados entre sí, los cuales cumplen la función de soportar carga vertical y servir de cerramiento en la vivienda.



Fuente: El autor.

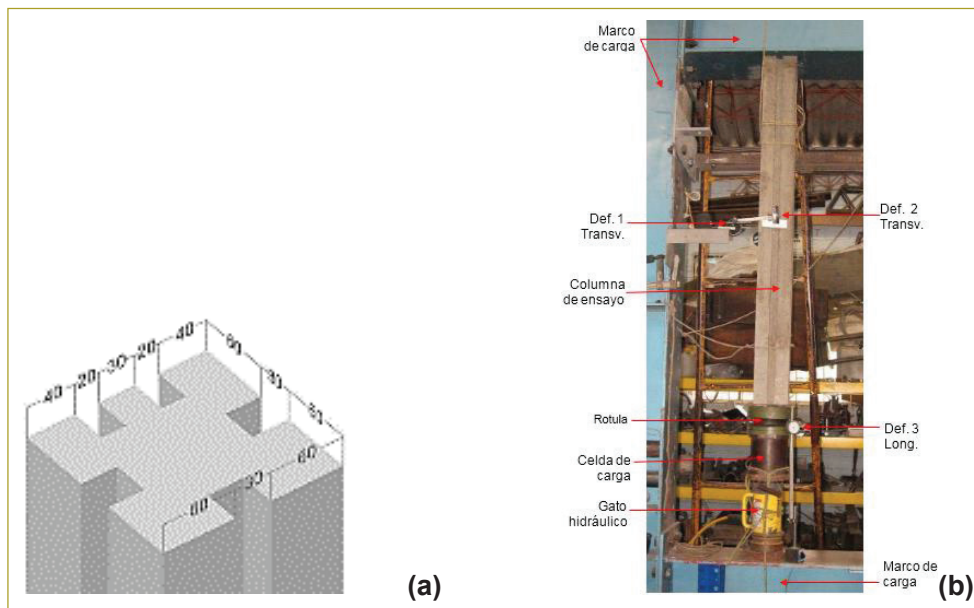
Figura 4 (a) (b) Falla típica en muretes en ensayo a compresión axial. (c) Falla típica en ensayo a compresión diagonal.

Se estudiaron diez muestras ensayadas a compresión axial y dos muestras ensayadas a compresión diagonal mediante una máquina universal UH-100A, enumeradas con el prefijo CMT más el consecutivo de las muestras. El sentido de estudio es en Z y el valor característico de esfuerzo a la compresión axial en muretes fue de 5,22 MPa. En el ensayo de carga de compresión diagonal, los bb° de los muretes se deslizaban en su eje horizontal al instante de ser sometidos a carga.

La falla típica fue por pandeo. La muestra se considera esbelta en uno de sus sentidos, por lo que el elemento falló al ser sometido a compresión. Se destaca que, además del pandeo, hubo aplastamiento en los bb° que lo conforman, similar al presentado en los ensayos a bb° .

El comportamiento encontrado durante el ensayo a compresión diagonal se debe a que los bb° no están trabados entre sí en sentido horizontal, oponiéndose a este desplazamiento tan sólo la fuerza de fricción entre bb° . Por lo tanto, para impedir desplazamientos excesivos es necesario que estén enmarcados en su perímetro o que tengan elementos que impidan su desplazamiento.

Columnas. Estos elementos se enumeraron como CC, más el consecutivo de la muestra. Se estudiaron quince muestras a compresión axial, con dimensiones de 150 x 150 mm y longitudes de 800, 1600 y 2400 mm, cinco muestras por cada longitud diferente. La sección teórica aparece más adelante (figura 5). El sentido de estudio fue en Z. Las muestras se sometieron a com-



Fuente: El autor.

Figura 5 (a) Sección típica de columnas y vigas con pestañas. (b) Montaje de ensayo a compresión típico en columnas.

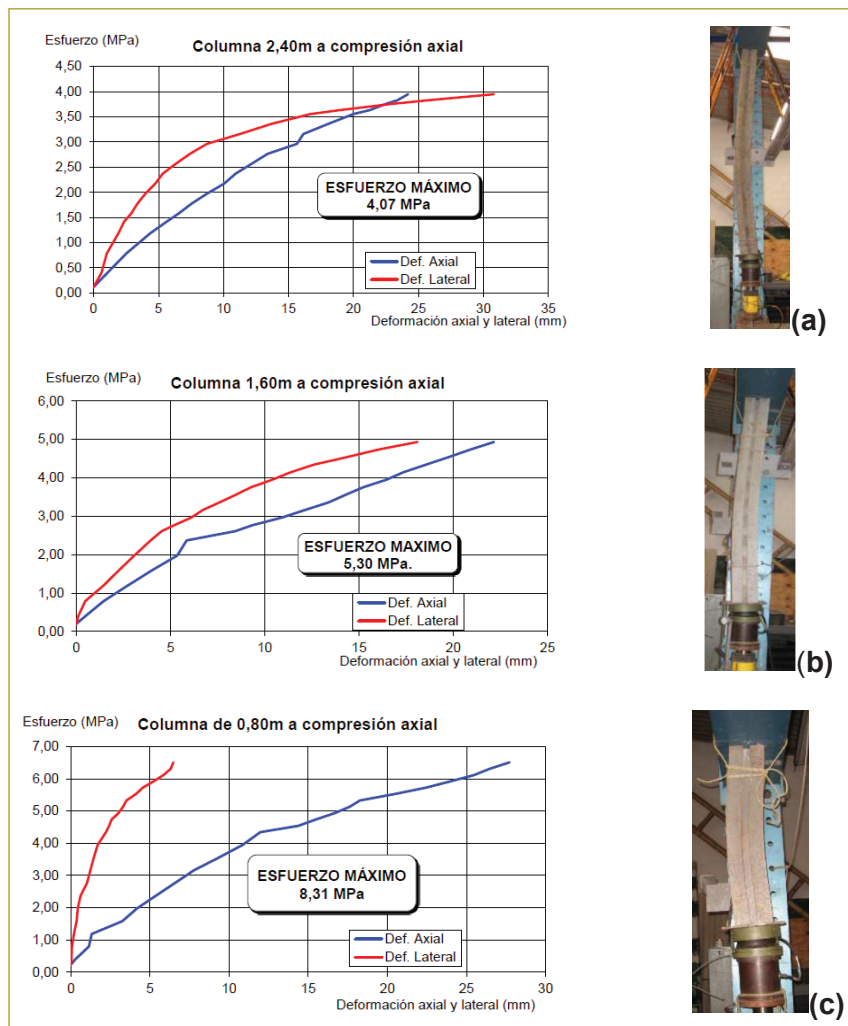
Tabla 3
Resultados de ensayos a compresión en columnas y análisis estadístico

Columna de 2,40 m	Carga máxima (kN)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Columna de 1,60 m	Carga máxima (kN)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	Columna de 0,80 m	Carga máxima (kN)	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)
Promedio	72,7	3,89	Promedio	105,4	5,64	Promedio	151,4	8,09
Desviación estándar	5,75	0,3	Desviación estándar	6,6	0,47	Desviación estándar	9,580	0,54
Coefficiente de variación	8 %	8 %	Coefficiente de variación	6 %	8 %	Coefficiente de variación	6 %	7 %
Valor característico	59,3	3,17	Valor característico	91,1	4,63	Varlo característico	130,6	6,81

presión axial en un marco de carga mediante un gato hidráulico y celda de carga (figura 5). El valor característico de esfuerzo a la compresión en columnas fue de 3,17, 4,63 y 6,81 MPa, para columnas de 2400, 1600 y 800 mm, respectivamente. El análisis estadístico de los resultados de los ensayos se puede ver en la tabla anterior (tabla 3).

La falla característica fue por pandeo general (figura 6).

La resistencia a compresión en columnas es directamente proporcional a la longitud del elemento, por lo que se comporta similar a lo establecido en el modelo matemático de Euler para elementos esbeltos, pero no



Fuente: El autor.

Figura 6. Comportamiento de las columnas durante ensayo a compresión y fallas típicas en columnas de 2,40, 1,60 y 0,80 m. (a) muestra CC-01; (b) muestra CC-06; (c) muestra CC-11.

cumple otras hipótesis del modelo por no cumplir la ley de Hooke, ser heterogéneo y anisótropo.

Las columnas de la estructura tipo vivienda son de longitud 2,40 m, ensambladas a bB® para formar muros. Los resultados de estas columnas variaron 8 % y soportan 3,17 MPa de esfuerzo último a compresión.

Resistencia a la tensión

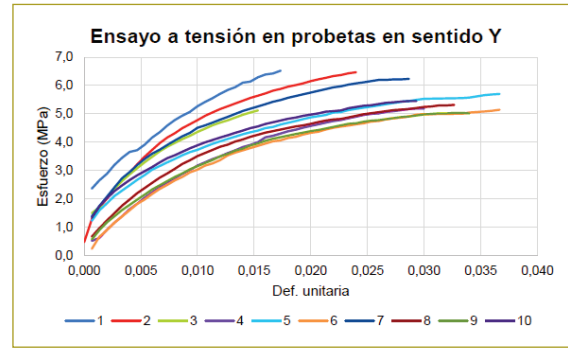
Probetas a tensión. Se estudiaron diez muestras a tensión de 515 x 100 x 15 mm, cuya sección teórica se muestra posteriormente (figura 7), se ensayaron en una máquina universal UH-100A según la norma ISO 527, las muestras se extrajeron de bB® por medio de corte y refrentadas. Se enumeraron con el prefijo T, más el consecutivo de muestras, las cuales arrojaron un valor característico de esfuerzo máximo a tensión de 4,57 MPa, con un coeficiente de variabilidad del 11 %. El análisis estadístico de los resultados aparece después (tabla 4). Se estudió y graficó el comportamiento lateral de cada muestra y a partir de éstas se pudo determinar el módulo de elasticidad, con valor característico de 251,14 MPa.

Todas las muestras fallaron en la zona estrecha establecida para fallar (figura 7 (b)); sin embargo se obtuvieron diferentes modos de fallas. Seis de las muestras fallaron en el centro de la muestra y cuatro en el extremo.

Durante estos ensayos se descartó la muestra T03 debido a que se deslizó de las mordazas de la máquina y no llegó a la falla. En las muestras falladas no se observaron reducción de la sección en la zona de falla ni alargamiento significativo del material en ésta, por lo que se puede inferir que el tipo de falla es relativamente frágil.

Resistencia a la flexión

Vigas con pestañas. Las vigas con pestañas son utilizadas como elementos de borde superior e inferior en



Fuente: El autor.

Figura 8. Comportamiento de muestras durante ensayo a tensión en probetas.

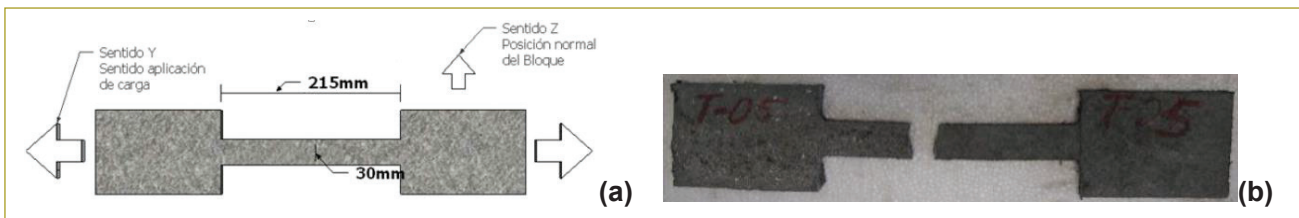
Tabla 4

Resultados de ensayos a tensión en probetas y análisis estadístico

Muestras a tensión	P máx. (kN)	σ máx. (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
Promedio	2,845	5,708	341,177
Desviación estándar	0,28	0,598	54,118
Coefficiente de variación	9,85 %	10,50 %	15,80 %
Valor característico		4,57	251,14

muros, como vigas de remate y vigas de cimentación. Estas vigas tienen una sección transversal de 150 x 150 mm (figura 5 (a)) y una longitud de 1160 mm; se estudiaron cuatro vigas a flexión mediante montaje (figura 9 (a)) y se enumeraron como VR1 hasta VR4. El ensayo se realiza en un marco de carga y la carga es aplicada por medio de gato hidráulico en los tercios de la viga.

Las muestras arrojaron un valor característico de momento último en el centro de la luz de 1,28 kN*m, con un coeficiente de variación de 14 %, y su falla típica fue en el centro de la luz (figura 9 (b)). El valor característico de módulo de elasticidad arrojado fue de 353 MPa. El valor de módulo de elasticidad se calculó



Fuente: El autor.

Figura 7. (a) Esquema probeta a tensión; (b) Falla típica de muestra T-05 ensayada a tensión.

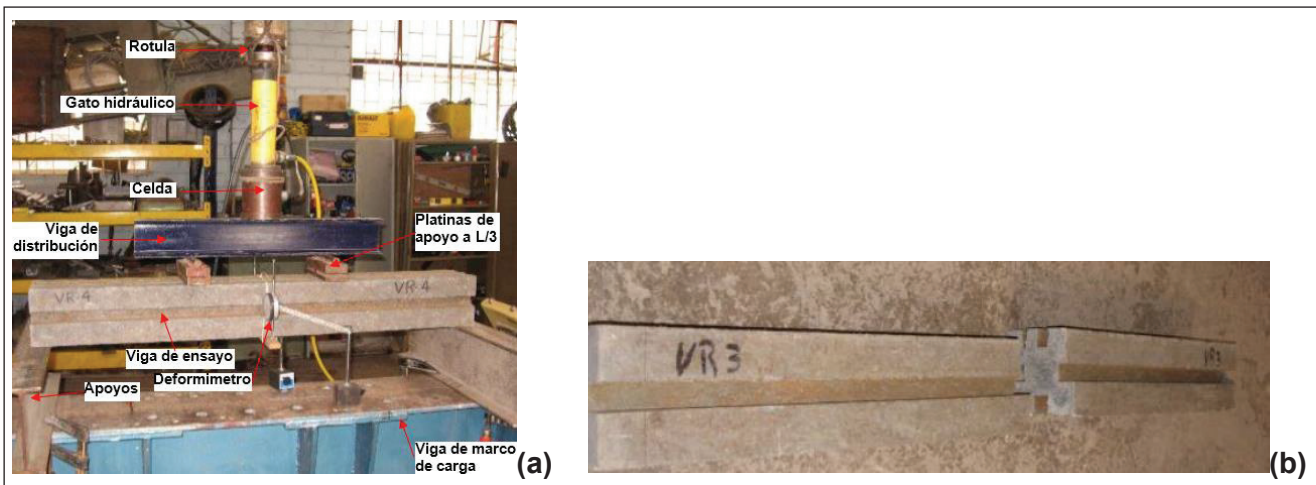
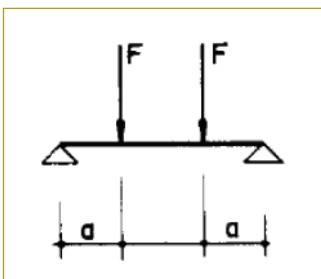


Figura 9 (a) Montaje típico de ensayo a flexión en vigas; (b) Falla típica de viga con pestañas sometidas a flexión, muestra VR3. Fuente: El autor.

deduciéndolo de la ecuación I para un patrón de carga (figura 10). En la siguiente tabla 5 se muestra el análisis estadístico de los resultados (tabla 5).

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{Fa(3L^2 - 4a^2)}{24EI}$$

Ecuación I. Deflexión máxima en centro de viga para patrón de carga en L/3 y L2/3 con apoyos simples.



Fuente: El autor.

Figura 10. Patrón de carga típico en ensayos a flexión de vigas.

El comportamiento de las vigas durante el ensayo de deflexión se observa en la figura siguiente (figura 11 (a)), en la cual cada muestra tiene una gráfica que llega hasta una carga máxima que indica hasta dónde fue posible medir la deformación durante el ensayo, ya que los deformímetros llegaron al límite de extensión, por lo cual se continuaron los ensayos hasta fallar las muestras a flexión, sin medir deformaciones.

Tabla 5

Resumen de resultados de carga máxima, momento máximo en centro de luz y módulo de elasticidad para vigas con pestañas de 1,16 m

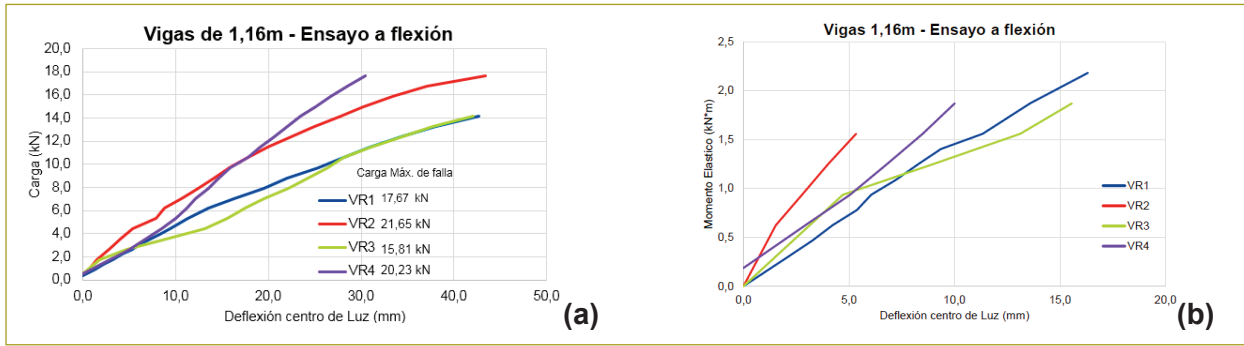
Vigas con pestaña	Carga máxima	Momento máximo (centro de luz)	Módulo de elasticidad (Ez)
	kN	kN*m	MPa
Promedio	18,8	1,87	630
Desviación estándar	2,61	0,26	139
Coefficiente de variación	14 %	14 %	22 %
Valor característico	13,6	1,28	353

En la figura siguiente se puede apreciar el comportamiento del momento elástico en el centro de la luz de las vigas durante el ensayo de deflexión (figura 11 (b)); el momento se calculó mediante la ecuación II para solicitaciones en el rango elástico del material, el cual se determinó mediante la identificación de una pendiente tangente en cada gráfica de la figura citada (figura 11 (a)). Se infiere que el material tiene grandes deformaciones mientras es sometido a carga.

$$M = \frac{\sigma_{\text{máx}} * I}{c}$$

Ecuación II. Momento flector.

Viguetas o correas. Las viguetas de prPEAD, utilizadas como elementos que conforman las cerchas que soportan la cubierta de la vivienda, tienen una sección



Fuente: El autor.

Figura 11 (a) Comportamiento de vigas con pestañas sometidas a flexión según carga aplicada; (b) Comportamiento del momento elástico en vigas con pestañas sometidas a flexión.

rectangular de 55 x 120 mm y una longitud de 1500 mm; se estudiaron cinco muestras a flexión mediante montaje típico (figura 9 (a)) y se enumeraron como R1 hasta R4. El valor característico de momento último en el centro de la luz fue de 0,46 kN*m. El valor característico de módulo de elasticidad fue de 1100 MPa. A continuación se muestra la falla típica de las viguetas sometidas a flexión (figura 12).



Fuente: El autor.

Figura 12. Falla típica de viguetas sometidas a flexión, muestra R2.

En la figura siguiente (figura 13) se grafica la carga aplicada vs deformación en el centro de la luz y se indica la carga máxima soportada por la viga antes de la falla.

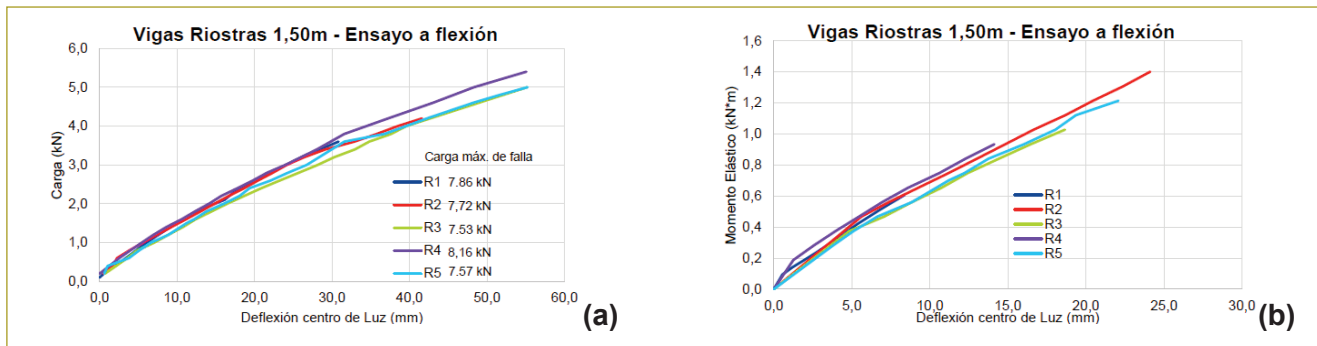
Se puede observar que los datos hasta la carga máxima no están graficados, porque la extensión de los deformímetros es limitada y no pudieron registrarse más datos de deformación luego de la última carga en la gráfica.

Seguidamente se muestran el análisis estadístico de los resultados (tabla 6).

Tabla 6

Resumen de resultados de carga máxima, momento máximo en centro de luz y módulo de elasticidad para viguetas de 1,50 m

Vigueta 1,50 m	Carga máxima	Momento máximo (centro de luz)	Módulo de elasticidad (Ez)
	kN	kN*m	MPa
Promedio	7,77	1,04	1680
Desviación estándar	0,26	0,3	310
Coefficiente de variación	3,34 %	28,80 %	18,40 %
Valor característico	7,22	0,46	1100



Fuente: El autor.

Figura 13 (a) Comportamiento de viguetas con pestañas sometidas a flexión según la carga aplicada; (b) Comportamiento del momento elástico en viguetas sometidas a flexión.



Fuente: El autor.

Figura 14. Falla típica en vigas acopladas sometidas a flexión, pandeo local de la lámina metálica.

Al comparar el valor característico de momento máximo en el centro de la luz de $0,46 \text{ kN}\cdot\text{m}$ en viguetas contra el $1,28 \text{ kN}\cdot\text{m}$ en vigas con pestañas, se concluyó que para los resultados en viguetas es 44 % mayor; esto puede deberse tanto a la mayor sección transversal como a la menor longitud entre apoyos.

El módulo de elasticidad en sentido Z promedio es 1,55 mayor para las vigas viguetas, superando a las vigas con pestañas; sin embargo, estos valores son muy variables para los dos tipos de elementos, lo que puede deberse a la variabilidad de las propiedades mecánicas de la materia prima, ya que son elementos con todo tipo de material prPEAD.

Vigas acopladas de sección compuesta. Las vigas acopladas tienen una sección compuesta por dos viguetas rectangulares y una lámina metálica de 3 mm en medio tipo sándwich, unidos por cuatro pernos a lo largo de su longitud de 2400 m. Se ensayaron cinco muestras a flexión y se identificaron desde VAC-1 hasta VAC-5. El valor característico de momento último en el centro de la luz fue de $2,47 \text{ kN}\cdot\text{m}$, con un coeficiente de variación de 21%. A continuación se muestra el análisis estadístico de los resultados (tabla 8). Así como la falla típica de las vigas acopladas sometidas a flexión (tabla 14).

Posteriormente se grafica la carga aplicada vs deformación en el centro de la luz y se indica la carga máxima soportada por la viga (figura 15).

Debido a que la sección transversal de las vigas está conformada por la unión de dos viguetas de prPEAD y una lámina metálica, se determinó la inercia de las vigas acopladas por medio del método de las secciones. El módulo de elasticidad de las secciones de plástico se tomó como 1,06 GPa, obtenido en los ensayos de flexión en viguetas o correas. Las propiedades geométricas de las vigas se muestran en la tabla anterior (tabla 7).

Tabla 8

Resumen de resultados de carga máxima y momento máximo en centro de luz para vigas acoplados de 2,40 m

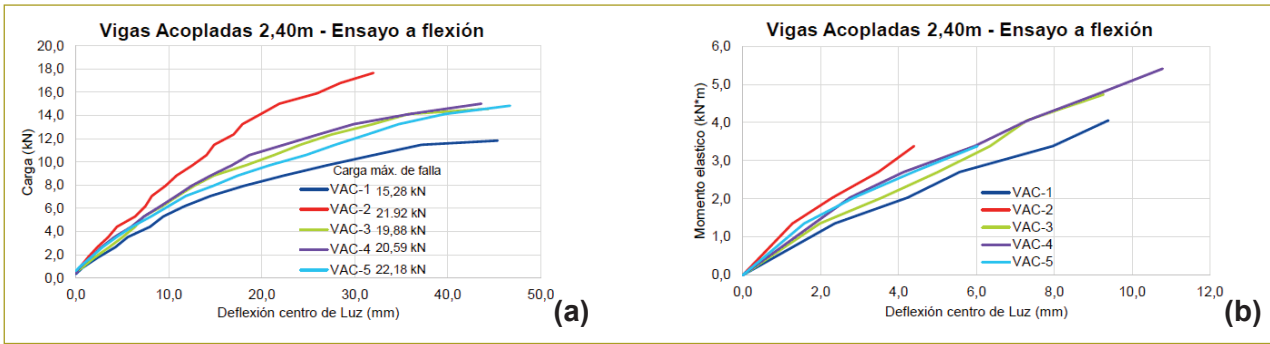
Vigas 2,40 m	Carga máxima	Momento máximo (centro de luz)
	kN	$\text{kN}\cdot\text{m}$
Promedio	19,97	4,19
Desviación estándar	2,79	0,88
Coefficiente de variación	14 %	21 %
Valor característico	13,64	2,47

El momento flector determinado es superior a los dos tipos de vigas anteriormente estudiadas a pesar del aumento de longitud entre apoyos, sin embargo en

Tabla 7

Propiedades físicas del material y propiedades geométricas de las vigas acopladas

Sección	Módulo de elasticidad		Factor de transformación			
	VAC1	VAC2	VAC3	VAC4	VAC5	UN
Acero:	200	GPa	n : 188,68			
Plástico prPEAD :	1,06	GPa				
Secc. transformada						
Ancho	639	634,8	634,8	634,8	635,8	mm
Altura	129	127	127	127	127	mm
Inercia	114.276.424	108.360.427	108.360.427	108.360.427	108.531.126	mm^4



Fuente: El autor.

Figura 15 (a) Comportamiento de vigas acopladas sometidas a flexión según la carga aplicada; (b) Comportamiento del momento elástico en vigas acopladas sometidas a flexión.

este tipo de viga existe un elemento metálico, el cual incrementa su inercia. A continuación se muestra el resumen de los resultados promedio de cada tipo de viga de prPEAD (tabla 9).

Tabla 9

Resumen de resultados de carga máxima, momento máximo en centro de luz y módulo de elasticidad para todas las vigas ensayadas

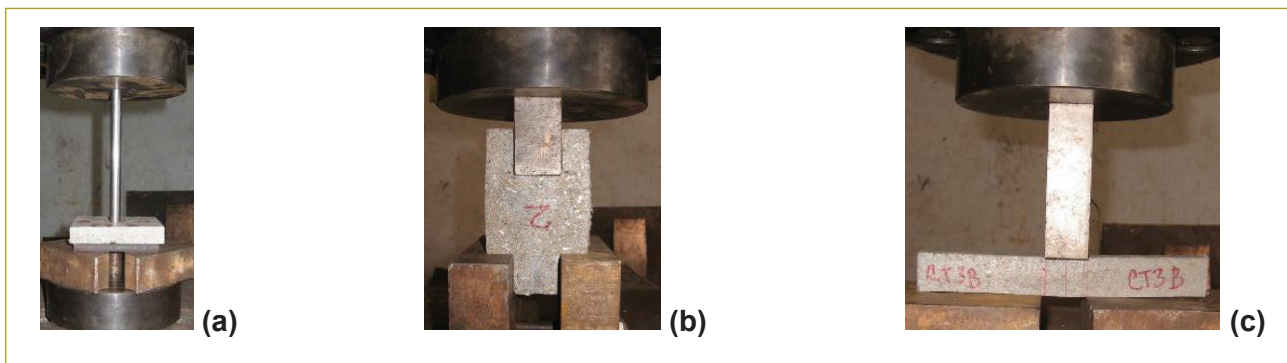
Vigas prPEAD	Carga máxima promedio	Momento máximo (centro de luz)	Módulo de elasticidad (Ez)
	kN	kN*m	MPa
Vigas con pestañas 1,16 m	13,6	1,28	353
Viguetas o correas 1,50 m	7,22	0,46	1100
Vigas acopladas	13,64	2,47	-

Resistencia a cortante

Para el estudio de la resistencia a cortante inicialmente se estudiaron 3 tipos de muestras y tres especímenes por muestra, en la figura siguiente se observan los tipos de muestras (figura 16). El comportamiento y el modo de falla a corte puro establecieron el tipo de muestra finalmente escogida para determinar la resistencia a cortante del material prPEAD.

Muestra tipo lámina. Las muestras tipo lámina con sección 100 x 100 x 18 mm ensayadas a corte se realizaron según la norma ASTM-732, mediante el uso del punzón en sentido de estudio X; se estudiaron tres muestras, el valor característico de esfuerzo a cortante fue de 5,60 MPa y el coeficiente de variación de 8,14 %.

En cada muestra ensayada se podía observar estiramiento de las fibras en el perímetro del área de corte y perforación de la lámina donde se cargó bajo el

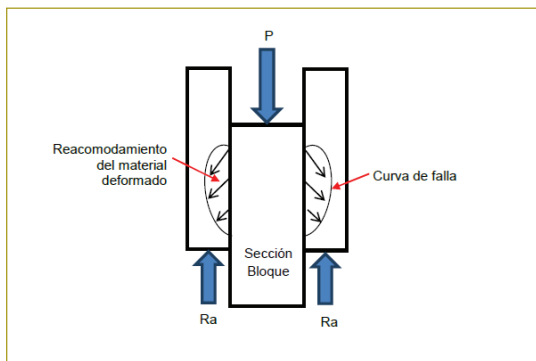


Fuente: El autor.

Figura 16 (a) Muestra tipo lámina (b) Muestra tipo sección de bB®; (c) Muestra tipo sección de aleta de bB®.

punzón metálico, sin desprender porción de material; la falla típica fue como se observa en la figura anterior (figura 16 (a)).

Muestra tipo sección de bB®. Son muestras tipo bB® cortadas a la mitad, ensayadas a corte (figura 16 (b)); se estudiaron tres muestras y su comportamiento fue similar al mostrado en el esquema de la figura siguiente (figura 17). El valor característico de esfuerzo a cortante para las tres muestras ensayadas fue de 2,58 MPa y coeficiente de variación de 8,10 %. La falla típica se muestra más adelante (figura 18 (b)).



Fuente: El autor.

Figura 17. Hipótesis del comportamiento del material durante ensayo a cortante.

Muestra tipo aletas. Se utilizan tres muestras con sección de 18 x 30 x 50 mm, cortadas de las aletas inferiores de los bB® y ensayadas (figura 16 (c)). El modo de falla típica (figura 18 (c)) no se considera corte puro, ya que es similar a una falla por flexión en el centro de la

luz. Los resultados no reflejan la capacidad del material a resistir esfuerzos cortantes.

Se determina que el tipo de muestra que refleja la capacidad a resistir esfuerzos cortantes es la muestra tipo lámina, por lo cual se realizan ensayos a cortante a siete muestras más, lo que arroja un valor de esfuerzo máximo de 3,90 MPa (tabla 10).

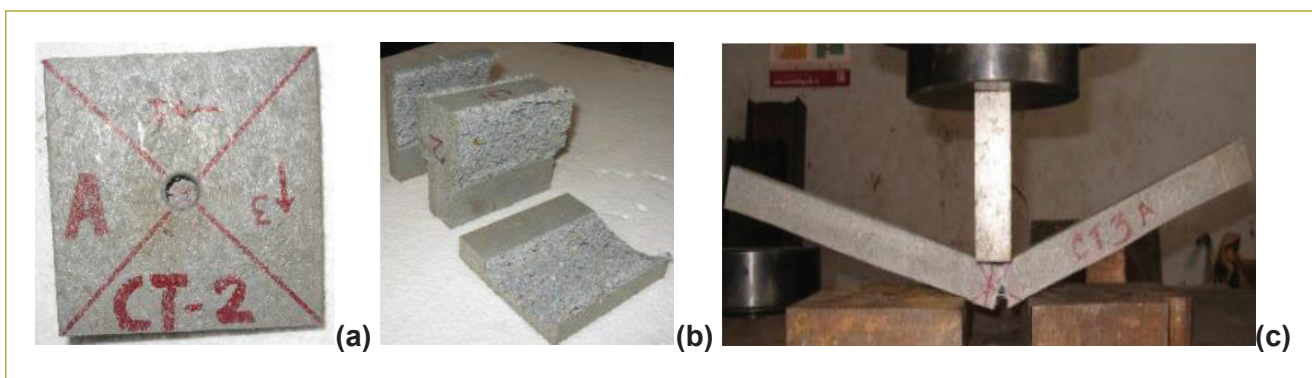
Tabla 10

Valores de carga máxima y esfuerzo máximo promedio para diez muestras tipo lámina ensayadas a cortante

Muestras tipo lámina	P máx. (kN)	Esf. máx. (MPa)
Promedio	3,78	6,42
Desviación estándar	0,709	1,191
Coefficiente de variación	18,70 %	18,50 %
Valor característico		3,9

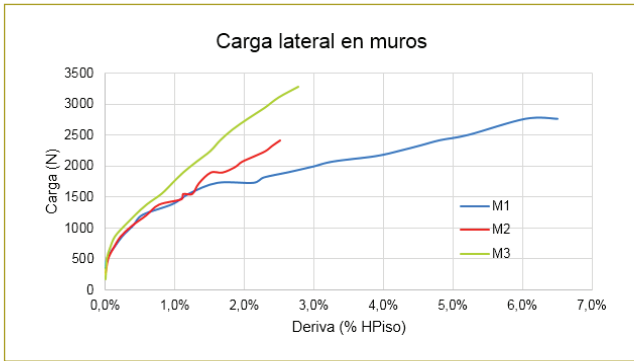
Muros ensamblados a escala real. Los muros ensamblados a escala real son utilizados en la vivienda como muros divisorios y forman parte del sistema de resistencia. Se ensayaron tres muros a carga lateral estática para simular sollicitaciones sísmicas. El valor característico de resistencia a carga lateral estática fue de 1,69 kN y se produjo una deformación promedio de 74 mm en el sentido de la carga.

Más adelante se puede apreciar el comportamiento de la deriva de los muros en relación con la carga durante el ensayo. El muro 3 arrojó la mayor resistencia al ser sometido a carga lateral con 3,29 kN (figura 19).



Fuente: El autor.

Figura 18 (a) Falla típica de muestra tipo lámina; (b) Falla típica de muestra tipo sección de bB®; (c) Muestra tipo sección de aleta de bB®.



Fuente: El autor.

Figura 19. Deriva de los muros durante ensayo a carga lateral estática a escala real.

Tabla 11

Resumen de resultados de carga y desplazamiento máximo resistidos por muros a escala real durante ensayo a carga lateral estática

Muros a carga lateral estática	Carga máxima resistida (kN)	Desplazamiento máximo (mm)
Promedio	2,83	73,4
Desviación estándar	0,435	–
Coefficiente de variación	15,40 %	–
Valor característico	1,69	–

Durante los tres ensayos, el gato hidráulico con el cual se aplicaba la carga lateral llegó al límite de extensión por lo que se finalizaba el ensayo; sin embargo, los muros pudiesen resistir aún más carga. Como se observa en la figura siguiente (figura 20), durante los ensayos las columnas que enmarcan el muro se deflecaron y debido a esto los bB® se deslizaban en sentido

horizontal, similar a lo sucedido durante los ensayos de compresión diagonal en muretes, además de que se separaban unos de otros en la zona inferior derecha o zona extrema a la zona de carga. Otro efecto durante el ensayo fue el giro del muro paralelo a su plano (figura 20 (a)); también se observó levantamiento de las columnas, es decir, que se produjeron deformaciones en las uniones (figura 21 (a) y (b)).

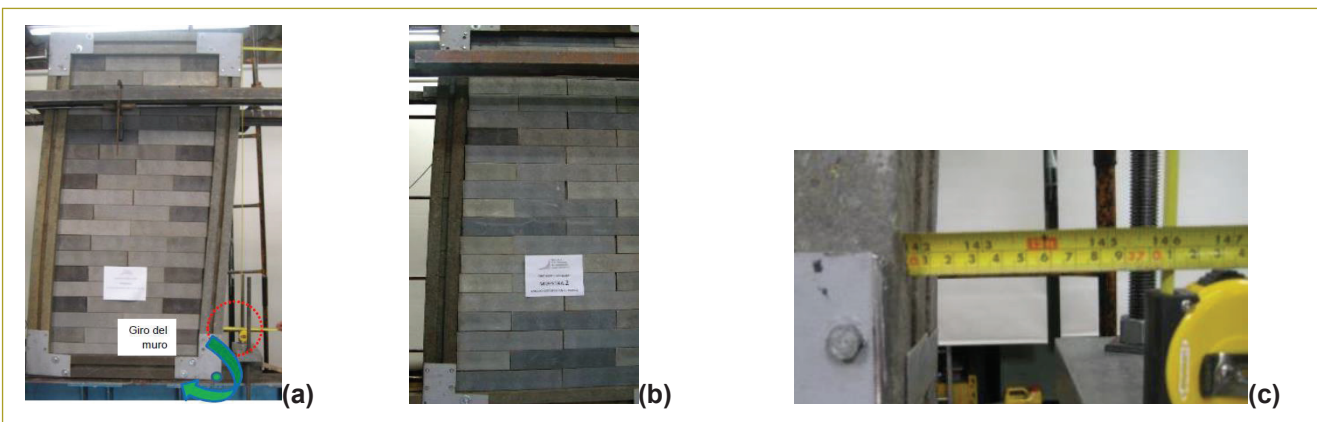
Conocida la carga lateral resistente de los muros pudo compararse con las cargas sísmicas teóricas bajo la envolvente de espectros elásticos de diseño contemplados en la NSR-10 para un suelo tipo E, para las tres zonas de amenaza sísmica en Colombia, condiciones críticas según la norma. La masa de la estructura es de 82,42 kN, aproximadamente. La estructura consta de cuatro muros perimetrales, dos en cada sentido; los muros miden 5690 y 6330 mm en sentido X y Y, respectivamente (figura 24 (a)). El cortante sísmico en la base se muestra a renglón seguido para cada zona de amenaza sísmica (tabla 12).

Tabla 12

Cortante sísmico en la base de vivienda de prPEAD

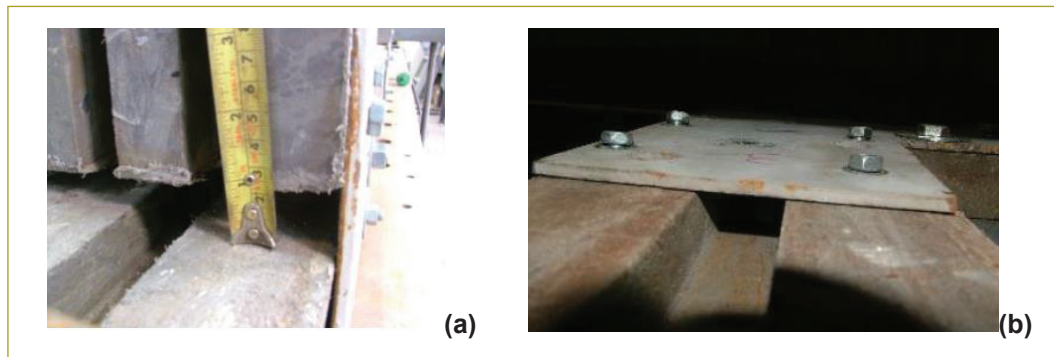
Zona de amenaza	Sa (g)	Vs (N)
Alta	1,125	90,867
Intermedia	0,85	68,655
Baja	0,625	50,483

A continuación se muestran los cortantes sísmicos por unidad de longitud de cada muro en cada sentido (tabla 13).



Fuente: El autor.

Figura 20 (a) Falla típica en muro a escala real sometido a fuerza cortante y representación del giro ocurrido en el muro M1; (b) Deslizamiento y separación de bB®; (c) Detalle de desplazamiento ocurrido en muestra M1.



Fuente: El autor.

Figura 21 (a) Levantamiento de columna debido a giro del muro; (b) Deformación en los tornillos de la unión superior izquierda viga columna en el muro M1.

Tabla 13

Cortante sísmico por unidad de longitud para cada muro en cada sentido

	Zona de amenaza		
	Alta	Intermedia	Baja
Muros en X M1 y M2	Vx (N/m) 14,355	Vx (N/m) 12,066	Vx (N/m) 8,872
Muros en Y M1 y M2	Vy (N/m) 15,970	Vy (N/m) 10,846	Vy (N/m) 7,975

El valor característico de resistencia máxima resistida por los muros a escala real debido a ensayos de carga lateral estática fue de 1,69 kN/m, para un desplazamiento promedio de 74 mm, mientras que las solicitaciones sísmicas exigidas por la NSR-10 para cada muro de la estructura son variables según su longitud, pero superan la resistencia lateral de los muros; por lo tanto, los muros por sí solos no son capaces teóricamente de resistir las solicitaciones de cortante sísmico para ninguna de

las zonas de amenaza sísmicas en la NSR-10. De esta comparación se puede inferir que es necesario restringir el desplazamiento horizontal de los bloques unitarios en prPEAD que conforman el muro ensayado a escala real, y de esta forma resistir mayores cargas horizontales estáticas en conjunto.

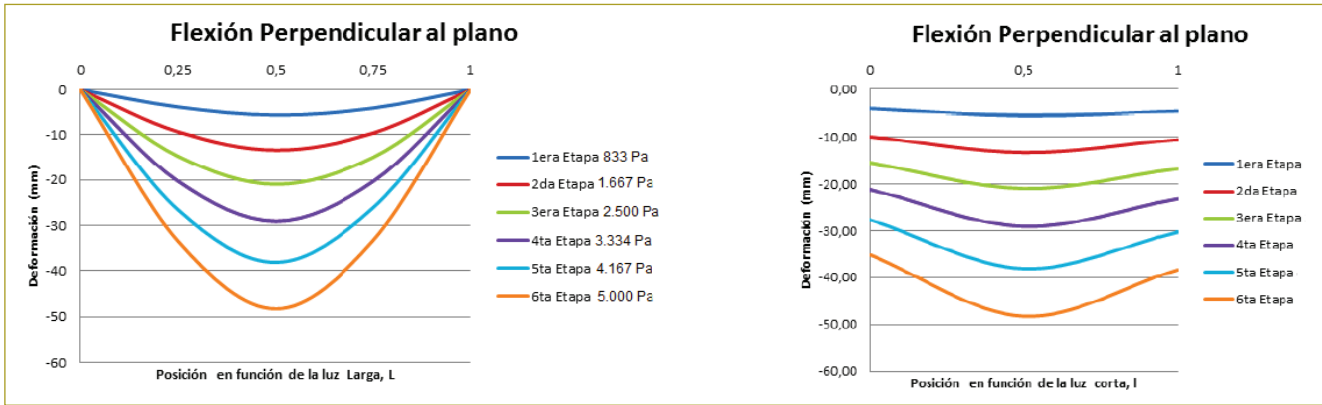
Resistencia a carga uniforme sobre el plano del muro

Muros ensamblados a escala real. Se ensayaron tres muros completos de 1270 x 2250 mm, aplicando carga mediante un protocolo y secuencia de carga en el plano del muro, mientras éste se apoyaba en sus dimensiones más cortas (figura 22 (a)); el modo de falla típica se observa a continuación (figura 22 (b)), en tanto que el valor característico de carga distribuida resistido fue de 3,14 kN/m²; sin embargo, por razones de seguridad y estabilidad del montaje no se pudo seguir cargando el muro.



Fuente: El autor.

Figura 22 (a) Colocación de carga en el muro; (b) Modo de falla por deflexión del muro.



Fuente: El autor.

Figura 23. Comportamiento del muro en sentidos longitudinal y transversal del muro durante ciclos de carga.

La falla producida es por deflexión excesiva del muro y separación de bB[®] en la parte central del muro, donde se produce el mayor momento flector. El comportamiento de los muros, medido con diferentes deformímetros en la parte de abajo del muro, se aprecia en la figura anterior (figura 23).

Conocida la carga distribuida máxima promedio resistida por los muros en su plano, pudo compararse con las cargas de viento producidas con las consideraciones más críticas en la NSR-10, región de exposición 5; la estructura tiene una altura de muros de 2600 mm y altura máxima a cubierta de 3690 mm, rugosidad y exposición del terreno tipo B; realizando un análisis de viento por el método simplificado, se pudo calcular que la carga máxima debido al viento es de 0,93 kN/m². Es posible inferir que los muros ensayados bajo

carga distribuida fallaron por deflexión excesiva y por separación entre sí de bloques Brickarp[®], aunque al comparar el valor característico de resistencia a carga distribuida en el plano del muro resulte 3,14 veces mayor que las sollicitaciones críticas de viento establecidas por la NSR-10. Posteriormente se muestran las presiones de viento consideradas (tabla 14).

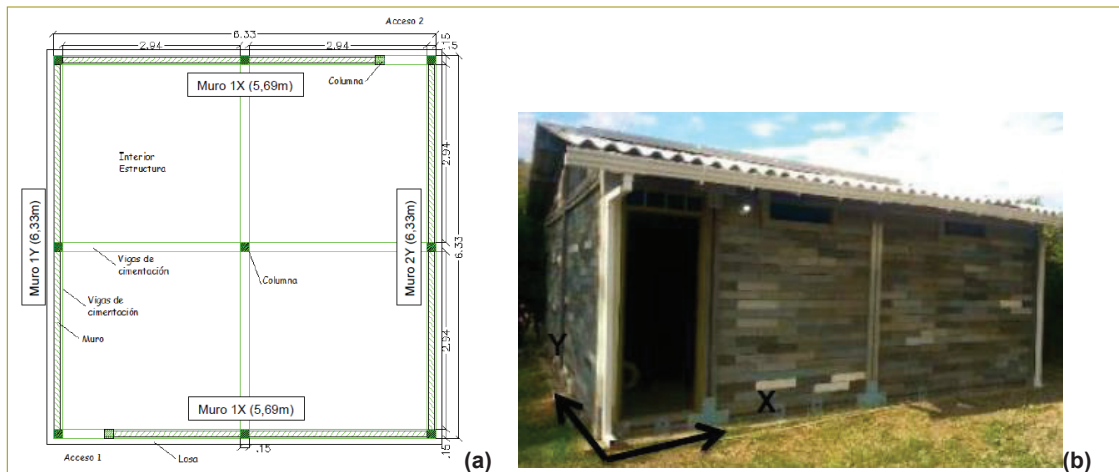
Resistencia a carga lateral estática

Vivienda a escala real. La configuración estructural de la vivienda (figura 24 (a)) está conformada por bB[®], columnas, vigas y muros de prPEAD. La estructura se construyó en Vijes (Valle del Cauca) y se sometió a carga y descarga lateral estática en sentido X, mediante un montaje como el observado en la figura siguiente

Tabla 14
Presiones básicas de viento Ps10 y presiones horizontales debido al viento Ps corregidas

	Zona	Sentido Y frontal de fuerza de viento		Sentido X posterior de fuerza de viento	
		Presión básica Ps10 (kN/m ²)	Presión viento Ps (kN/m ²)	Presión básica Ps10 (kN/m ²)	Presión viento Ps (kN/m ²)
Presión horizontal	A	1,07	0,927	0,81	0,701
	B	-0,31	-0,269	-0,42	-0,364
	C	0,71	0,616	0,53	0,463
	D	-0,17	-0,151	-0,24	-0,210
Presión vertical	E	-0,97	-0,840	-0,97	-0,841
	F	-0,65	-0,563	-0,55	-0,477
	G	-0,66	-0,574	-0,66	-0,575
	H	-0,50	-0,437	-0,42	-0,364

Fuente: El autor.



Fuente: El autor.

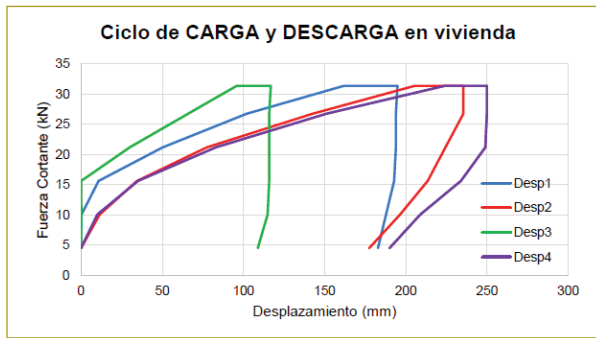
Figura 24 (a) Configuración estructural de la vivienda de prPEAD; (b) Sentidos de aplicación de carga en la vivienda prPEAD.

Tabla 15 (a)
Incremento de carga en vivienda prPEAD sometida a carga lateral estática

Ciclos y tiempo de CARGA	Incremento de carga kN	Fuerza cortante impuesta kN	Def. 1	Def. 2	Def. 3	Def. 4	Temperatura °C
			mm	mm	mm	mm	
0 Lectura inicial Hi: 1:10 pm	8,50	4,504	0	0	0	0	31
1 Hi: 1:18 pm Hf: 1:25 pm	19,00	10,07	0,3	11,5	0,2	10	32
2 Hi: 1:29 pm Hf: 2:03 pm	29,5	15,63	10,8	34,5	0,7	35	32
3 Hi: 2:08 pm Hf: 2:15 pm	40	21,2	50,3	77,5	30	83	31
4 Hi: 2:19 pm Hf: 2:21 pm	50,5	26,76	101,9	142,5	65,9	15	31
5 Hi: 2:25 pm Hf: 2:28 pm	59,2	31,37	161,9	205,5	95,9	224	30
0 H: 4:00 pm	59,2	31,37	194,9	235,5	116,9	250	30

Tabla 15 (b)
Decremento de carga en vivienda prPEAD sometida a carga lateral estática

Ciclos y tiempo de DESCARGA	Decrecimiento de carga kN	Fuerza cortante impuesta kN	Def. 1	Def. 2	Def. 3	Def. 4	Temperatura °C
			mm	mm	mm	mm	
0 Lectura inicial Hi: 4:00 pm	59,20	31,37	194,9	235,5	116,9	250	30
5 Hi: 4:05 pm Hf: 4:16 pm	59,20	31,37	194,9	235,5	116,9	250	30
4 Hi: 4:25 pm Hf: 4:29 pm	50,50	26,76	193,9	235,5	115,9	250	29
3 Hi: 4:31 pm Hf: 4:35 pm	40,00	21,2	193,9	224,5	115,9	249	29
2 Hi: 4:40 pm Hf: 4:45 pm	29,50	15,63	192,9	213,5	115,9	234	29
1 Hi: 4:50 pm Hf: 4:57 pm	19,00	10,07	187,9	196,5	114,9	209	29
0 Hi: 4:58 pm Hf: 5:05 pm	8,50	4,5	182,9	187,5	108,9	190	28



Fuente El autor.

Figura 25. Comportamiento de la vivienda de prPEAD durante ensayo de carga y descarga.

(figura 26 (a)); mediante un protocolo de carga y descarga durante cinco ciclos de carga se midió y observó el comportamiento de la estructura ante estas cargas. Se encontró que la estructura fue capaz de resistir una fuerza cortante de 30,76 kN y deformarse en el sentido de la carga hasta de 250 mm, es decir, una deriva del 9,29 %. En la tabla anterior se muestran los incrementos de carga y descarga durante ensayo (tabla 15).

Así mismo se puede observar el comportamiento de la vivienda de prPEAD en los puntos medidos durante ensayo de carga y descarga (figura 25).

Durante el ciclo de carga 3, se evidenció separación de los bloques entre sí en los muros paralelos al sentido de aplicación de carga, esto es, en los pórticos muro 1X y muro 2X. Durante el ciclo de carga 4 se evidenció separación de los bloques entre sí, tanto que pudo observarse entre muros. Luego de finalizar el ciclo de carga 5, la bandeja de carga reposó sobre un pedestal de concreto cercano (figura 26 (b)), lo que impidió el incremento de carga.

En los pórticos muro 1X y muro 2X existen en la estructura puertas metálicas instaladas, una abierta y otra

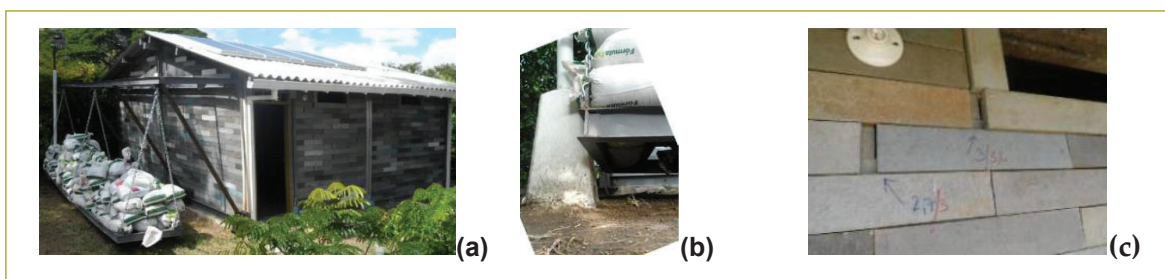
cerrada, respectivamente; esto influyó para que hubiera diferencia en el desplazamiento del pórtico debido al incremento de carga (figura 25).

El mayor desplazamiento se presentó en el pórtico central (pórtico #2) de la estructura con 250 mm; como era de esperarse, debido a la ausencia de muros ensamblados que aportaran rigidez a este pórtico, la falla típica de la estructura es su deformación en sentido de la carga (figura 26 (a)) y separación de bloques entre sí (figura 26 (c)); también se pudieron medir giros de las columnas en la unión inferior viga columna, similar a lo arrojado en ensayos de muros a escala real.

Conocidos el comportamiento y la resistencia de carga lateral de la estructura, se realiza un análisis sísmico de la estructura en el sentido de estudio X.

Conocida la carga lateral resistente de la estructura, pudo compararse con las cargas sísmicas teóricas bajo la envolvente de espectros elásticos de diseño contemplados en la NSR-10 para un suelo tipo E, para las tres zonas de amenaza sísmica en Colombia, condiciones críticas según la norma. El cortante sísmico en la base se determinó en una tabla anterior (tabla 12), mientras que el cortante sísmico por unidad de longitud para el conjunto de muros en sentido X fue de 31,94 kN/m, 24,14 kN/m y 17,74 kN/m para las zonas de amenaza sísmica alta, intermedia y baja, respectivamente. De la comparación se puede concluir que aunque la resistencia a carga lateral estática de la vivienda sea mayor que las solicitaciones de cortante sísmico según la NSR-10 para las zonas de amenaza sísmica baja e intermedia, el resultado no es representativo, ya que se ensayó una sola muestra (una casa ensayada).

Cabe aclarar que son necesarios estudios del comportamiento dinámico de la estructura y su comportamiento suelo-estructura que simulen el comportamiento real ante las solicitaciones sísmicas establecidas por la



Fuente: El autor.

Figura 26 (a) Falla típica de la estructura tipo vivienda sometida a carga lateral; (b) Bandeja de carga reposa sobre pedestal de concreto durante ensayo.

NSR-10, puesto que el ensayo hecho a la vivienda fue un ensayo de carga lateral estática, que si bien muestra luces del comportamiento ante cargas horizontales no es tan representativo como lo sería un ensayo dinámico.

Al ensayar la vivienda a carga lateral estática, los elementos que la conforman, como las columnas, vigas, viguetas o bloques Brickarp[®], no fallaron por fractura del elemento y tampoco colapsó la estructura, pero puede decirse que la estructura tuvo varios tipos de fallas diferentes de las mencionadas, como las deflexiones excesivas, rotaciones en las uniones viga-columna, levantamiento de columnas esquineras, desplazamiento o separación de los bloques Brickarp[®] entre sí y deformaciones permanentes de la estructura medidas hasta de 250 mm.

Deformaciones de hasta 250 mm no son comunes en estructuras convencionales con dimensiones similares y pueden generar pánico en las personas que la habitan.

CONCLUSIONES

- Se pudo establecer que el prPEAD es factible utilizarlo para fabricar elementos que conformen una estructura de habitabilidad temporal, de bodega temporal o de uso en caso de emergencia, pero para su implementación debe estudiarse primero su comportamiento ante altas temperaturas, su resistencia al fuego cumpliendo los lineamientos de la NSR-10, su comportamiento a volcarse ante cargas de viento, su comportamiento de flotabilidad en caso de inundación, el comportamiento de las uniones viga columna y su comportamiento dinámico ante cargas sísmicas.
- Se evaluó la capacidad de resistencia última de cada elemento, de donde se puede inferir que existió gran variabilidad en todos. La hipótesis de esta variabilidad de resultados se puede determinar en el protocolo de fabricación que no tiene establecido un lineamiento para la selección del material prPEAD.
- Es necesario el diseño de una unión viga columna capaz de soportar momentos para resistir cargas gravitacionales y horizontales ya que se pudo demostrar que las existentes en el sistema constructivo permiten rotaciones y desplazamientos de sus elementos, lo que ocasiona falla por deflexiones excesivas y falla por separación entre bloques Brickarp[®].
- La estructura puede catalogarse como S-5, según los niveles y rango de comportamiento estructural de la FEMA 356, ya que la estructura sufre daños graves al ser capaz de soportar cargas laterales.
- La estructura puede catalogarse como N-D (amenaza reducida), según los niveles de comportamiento de sistemas no estructurales del FEMA 356.
- Podemos inferir que los muros ensayados bajo carga distribuida fallaron por deflexión excesiva y por desplazamiento entre sí de bloques Brickarp[®], aunque al comparar el valor característico de resistencia a carga distribuida en el plano del muro resulte 3,14 veces mayor que las solicitaciones críticas de viento establecidas por la NSR-10, con tan sólo tres ensayos no puede asegurarse que estos muros sean lo suficientemente resistentes para cumplir con el reglamento NSR-10.
- Se demostró que en los muros conformados por bloques Brickarp[®] acoplados con columnas y vigas de prPEAD, no trabajan en conjunto, pues en los ensayos de muretes a carga a compresión diagonal, en los ensayos a carga lateral estática en muros a escala real y en la prueba de carga lateral estática en la vivienda a escala real los bloques se desplazan, distanciándose unos de otros en sentido horizontal.
- Se dedujo que el material prPEAD, al ser procesado y fabricado en elementos como bloques Brickarp[®], columnas o vigas, queda con vacíos o poros en su parte central interna. Se cree que esto sucede durante la fabricación ya que el material prPEAD es lavado y secado, quedando residuos de agua en el proceso. Luego el material pasa por la fundición en la extrusora, donde estas partículas de agua se evaporan y provocan burbujas de aire. Luego pasa esta mezcla fundida hacia el molde que le dará la forma al elemento que va a enfriarse rápidamente en un baño de agua fría. Por lo tanto, el material más cercano a la superficie del molde se enfriará más rápido en comparación con el material en la parte central y las burbujas de aire, las cuales quedan atrapadas en la parte interna del elemento. Este fenómeno se estableció como hipótesis en investigaciones realizadas por Nosker en 1992 (9), Zarillo en 1993 y Breslin en 1998 (11), investigaciones nombradas en el estado de la cuestión o este artículo.

- Se recomienda desarrollar investigaciones de resistencia al fuego para elementos prPEAD que puedan llegar a usarse como elementos no estructurales.

REFERENCIAS

1. Escuela Colombiana de Ingeniería. Plásticos protocolo curso de proceso de manufactura. Bogotá: s.n., 2007-2.
2. Flores, C.E. (octubre de 2009). Polímeros vs. plásticos. *Revista electrónica*, N.º 14, pp. 51-60.
3. Plastics Europe Association of Plastics Manufacturers (2015). *Plastics - the Facts 2015 An analysis of European plastics production, demand and waste data. UE-28 plus Norway and Switzerland*: s.n.
4. AIRD (2010). Estudio de *benchmarking* del sector de plástico entre República Dominicana y Colombia. Ref. 3389 v001.
5. Garay, C.A. El empaque [en línea]. Septiembre de 2012. [Citado el: 5 de abril de 2016]. <http://www.elempaque.com/temas/Industria-colombiana-de-plastico-mueve-USD4000-millones+4089645>.
6. Superintendencia de Sociedades. Superintendencia de Sociedades [en línea]. Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2014 [citado el 05 de 04 de 2016]. www.supersociedades.gov.co/asuntos-economicos-y-contables/estudios-y-supervision-por-riesgos/estudios-economicos-y-financieros/Paginas/Sectores-economicos.aspx.
7. Nirich, S. (2000). Diagnóstico provincial de los sistemas de gestión de residuos sólidos urbanos. Gobierno de la provincia de Córdoba. Córdoba (Argentina): Agencia de Ambiente de Córdoba.
8. Sierra, J. (s.f.). Tesis de grado: uso y aplicaciones del prPEAD en la fabricación de elementos estructurales para la construcción de viviendas en Colombia. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
9. *Plastics Recycling: Products and Processes* (1992). Chapter 9: *Commingled Plastics*. Nosker TJ, Van Ness KE. New York: Hanser Publishers: Ehrig R.J.
10. Zarillo G. & Lockert, C. (1993). *Feasibility of Using Commingled Recycled Plastic in Marine Construction*. Florida: s.n.
11. *Long-term engineering properties of recycled plastic lumber used in pier construction* (1998). Breslin, V., Senturk, U. Berndt, C. s.l.: Elsevier, vol. 23
12. Ficidadet [en línea] 2010 [citado el 18 de 5 de 2016.] <http://www.ficidadet.com/brickarp/caracteristicas.htm>.

Agradecimientos

A la Fundación Ficidadet, por su colaboración, asesoría en los conocimientos respecto a los elementos y materiales de plástico reciclado investigados; a la ingeniera Nancy Torres y al ingeniero Pedro Nel Quiroga, por su acompañamiento y apoyo.

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