

- ❑ **Política industrial.**
- ❑ **Calidad del agua en las cuencas de los ríos Torca, Salitre y Fucha para la evaluación regional del agua (ERA).**
- ❑ **Modelamiento de módulos fotovoltaicos con programas de análisis de sistemas de potencia en la red de distribución.**
- ❑ **La robótica móvil, una herramienta para la innovación y el mejoramiento del sector agroindustrial.**
- ❑ **Efecto de la carbonatación sobre las propiedades físicas de un agregado reciclado fino comercial.**
- ❑ **Experiencias de aprendizaje en ingeniería industrial usando Lego Mindstorms. Caso de estudio: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.**
- ❑ **Diseño y desarrollo de productos en Colombia más allá del aula. Una propuesta para su caracterización.**
- ❑ **Estudio de la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados y uso de microfibras.**
- ❑ **La Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura: análisis y recomendaciones para su operación.**
- ❑ **Alternativas para el suministro de agua apta para el consumo a pueblos indígenas en Colombia con condiciones geográficas particulares.**



- **Política industrial.**
- **Calidad del agua en las cuencas de los ríos Torca, Salitre y Fucha para la evaluación regional del agua (ERA).**
- **Modelamiento de módulos fotovoltaicos con programas de análisis de sistemas de potencia en la red de distribución.**
- **La robótica móvil, una herramienta para la innovación y el mejoramiento del sector agroindustrial.**
- **Efecto de la carbonatación sobre las propiedades físicas de un agregado reciclado fino comercial.**
- **Experiencias de aprendizaje en ingeniería industrial usando Lego Mindstorms. Caso de estudio: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.**
- **Diseño y desarrollo de productos en Colombia más allá del aula. Una propuesta para su caracterización.**
- **Estudio de la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados y uso de microfibras.**
- **La Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura: análisis y recomendaciones para su operación.**
- **Alternativas para el suministro de agua apta para el consumo a pueblos indígenas en Colombia con condiciones geográficas particulares.**

CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE	RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ
VOCALES	LUIS GUILLERMO AYCARDI BARRERO SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ MANUEL GARCÍA LÓPEZ MARÍA DEL ROSARIO MONTEJO PERRY ARMANDO PALOMINO INFANTE RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS HENRY MORENO MOSQUERA (representante de los profesores) NATALIA SALAMANCA CEBALLOS (representante de los estudiantes)
RECTORA	MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ
SECRETARIO	RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

DIRECTOR	JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
COMITÉ EDITORIAL	GERMÁN ACERO RIVEROS 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 ELKIN 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

¿A quién le compete la formación en valores?

Germán Eduardo Acero Riveros

7-22

Política industrial

Eduardo Sarmiento Palacio - Eduardo Sarmiento Gómez

El artículo consta de cinco partes. En la primera se analiza la evolución de la industria en Colombia y en el conjunto del planeta. En la segunda, la relación entre el sector externo y la industria. En la tercera, la industria como columna vertebral del modelo de crecimiento desbalanceado. En la cuarta, los desafíos actuales de la industrialización. El elemento central es una protección que compense la diferencia de productividad con los países desarrollados y la renegociación de los TLC.

23-32

Calidad del agua en las cuencas de los ríos Torca, Salitre y Fucha para la evaluación regional del agua (ERA)

Yuly Andrea Sánchez Londoño

En este artículo se presentan los resultados del estudio realizado para la evaluación regional del agua (ERA), por la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAB), de las cuencas de Torca, Salitre y Fucha, en el que se seleccionaron puntos de monitoreo para determinar la calidad del agua en relación con parámetros físicos, químicos y microbiológicos.

33-40

Modelamiento de módulos fotovoltaicos con programas de análisis de sistemas de potencia en la red de distribución

Javier Andrés Ruiz Garzón - Daniel José González Tristanco - Paola Andrea Mora Mora

En este artículo se describen las características de un sistema fotovoltaico (PV) conectado a la red de distribución y se determinan los principales parámetros que hay que considerar para su diseño.

41-46

La robótica móvil, una herramienta para la innovación y el mejoramiento del sector agroindustrial

Javier Alberto Chaparro Preciado - Héctor Fabio Cadavid Rengifo

En este artículo se presentan los avances que se han hecho en el tema de robots e imágenes agroindustriales en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, teniendo en cuenta elementos de hardware y software que se pueden utilizar para el desarrollo de herramientas, equipos o servicios de apoyo a los pequeños cultivadores en el país.

47-54

Efecto de la carbonatación sobre las propiedades físicas de un agregado reciclado fino comercial

Álvaro Guzmán Aponte - Nancy Torres Castellanos

En este artículo se presentan los resultados de la caracterización física de agregado reciclado fino (ARF) comercial y el efecto del uso del proceso de carbonatación para mejorar sus propiedades físicas. Antes y después del proceso de carbonatación, se determinaron las propiedades físicas de los agregados reciclados finos comerciales, incluyendo la absorción de agua y la densidad.

55-61

Experiencias de aprendizaje en ingeniería industrial usando Lego Mindstorms. Caso de estudio: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Ivonne Angélica Castiblanco Jiménez - Joan Paola Cruz González - Carlos Rodrigo Ruiz Cruz - Liliana del Carmen Pedraza Vega - Diana Catalina Londoño Restrepo

En el presente artículo se analiza el uso de Invention System Kits, en particular Lego Mindstorms Education EV3, en los procesos de enseñanza y aprendizaje en la educación superior.

63-69

Diseño y desarrollo de productos en Colombia más allá del aula. Una propuesta para su caracterización

Carlos Andrés Pérez Trislancho

El objetivo de este artículo es presentar detalladamente una propuesta de instrumento para recolección de información que permita contextualizar y caracterizar la práctica del diseño y desarrollo de productos en la industria colombiana para que, a partir de la información recopilada, se puedan adoptar al currículo de ingeniería los elementos relevantes encontrados, en pro del mejoramiento de la calidad de la educación en este campo del conocimiento.

71-79

Estudio de la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados y uso de microfibras

Dennis Alexander Collazos Bolaños - Nancy Torres Castellanos

La contracción plástica del concreto a causa de la rápida evaporación del agua en estado fresco puede generar fisuras que afectan la estética, funcionalidad, resistencia y durabilidad de elementos de concreto, en particular de aquellos que tienen una gran superficie expuesta y un volumen relativamente bajo como losas de pavimentos o pisos; esta fisuración y la posterior reparación generan costos económicos y ambientales adicionales.

81-90

La Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura: análisis y recomendaciones para su operación

Yadira Pérez Arciniegas - Carlos Oramas Leuro

En este artículo se presentan indicadores de rendimiento para las principales operaciones de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura (en adelante, SPRBUN) y se proponen unas recomendaciones que buscan mejorar las condiciones generales de operación.

91-103

Alternativas para el suministro de agua apta para el consumo a pueblos indígenas en Colombia con condiciones geográficas particulares

José Manuel Vásquez Leal - Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

En este artículo se desarrolla una metodología para plantear alternativas técnicas que posibiliten suministrar agua apta para el consumo a los pueblos indígenas en diferentes regiones de Colombia, dependiendo de su ubicación geográfica, mediante el desarrollo de seis etapas básicas.

105 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

¿A quién le compete la formación en valores?

GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS

Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

german.acero@escuelaing.edu.co

Desde el último cuarto del siglo pasado, cada gobierno ha presentado la educación como uno de los pilares de su plan de desarrollo, como una herramienta o instrumento para abrir el camino a la inclusión social, a la prosperidad, a la reducción de la pobreza y, claro, para alcanzar la paz en el país. Y es tal la importancia que se le ha dado que ha suscitado reformas permanentes y nuevos proyectos en todos los niveles, tratando de incrementar tanto la cobertura educativa como su calidad.

Se ha pretendido hacer obligatoria la educación media y mejorar año tras año los resultados en las pruebas Saber 11, Saber Pro y, por supuesto, en las pruebas internacionales, como base para ascender en los *rankings* internacionales, con el objetivo de lograr, entre otras cosas, que Colombia sea el país más educado de América Latina en el año 2025. Y si bien hay que reconocer el esfuerzo que ha hecho el Estado, se podrían escribir muchas páginas para analizar todos los aspectos incluidos no sólo en los planes de desarrollo, sino en las reformas al sistema de educación, en el Sistema Nacional de Calidad de la Educación y en los lineamientos del Banco Mundial.

Por esta razón, vale la pena hacer una reflexión mínima sobre el impacto que puede haber tenido durante este periodo la educación como instrumento de paz, de equidad y de prosperidad, así como sobre el concepto de calidad que se ha desarrollado a su alrededor, ya que hay un aspecto íntimamente ligado a todo lo anterior, origen de los problemas ya mencionados y en las magnitudes

que todos conocemos. Y es que cada vez que se habla de desigualdad, de exclusión, de pobreza, de inequidad y de violencia, definitivamente aparece lo que podríamos llamar un común denominador, pero que en realidad es un común multiplicador de estos aspectos y de muchos otros de los que no se ha hablado en estas notas: la desbordada e incontrolable corrupción en Colombia.

Si se mira un poco atrás, en nuestra corta historia, ya corrompida buena parte de la sociedad civil y consecuentemente el Estado, apareció la subversión como solución al mal; pero ésta, en corto tiempo, resultó también corrompida, junto con las instituciones encargadas de controlarla y dominarla; con la subversión fuera de control, nacieron, con el beneplácito de casi todo el país, otros grupos armados organizados para aniquilarla, pero terminaron seducidos ante las grandes sumas de dinero ofrecidas por quienes al final de cuentas financiaron, en el último periodo, todos estos procesos: los narcotraficantes.

Sin embargo, en los últimos años el país tomó conciencia de ello, manifestó su desacuerdo con la situación –aunque tímidamente– y quiso ponerle remedio; entonces se iniciaron los procesos de paz, de sometimiento y de reinserción de diferentes grupos, los que al final permitieron descubrir la triste magnitud del problema, pues la justicia, base de todos estos procesos, también estaba totalmente corrompida. Se podría decir, entonces, que se trata del gran problema nacional, porque afecta a todos los estamentos de la sociedad y

es el resultado de una de las más grandes falencias en el actual sistema de educación: la formación en valores.

Anteriormente, este proceso de formación era competencia, en primera instancia, de la familia; se reforzaba en los colegios, de férrea disciplina y exigente conducta, por medio de cursos de civismo, urbanidad y religión, entre otros, y en las iglesias se hacía un trabajo complementario. Bueno o malo, no podemos negar que, lejos de la perfección, en este aspecto todo tiempo pasado fue mejor, ya que había total claridad entre lo que estaba bien y lo que estaba mal, al menos en cuestiones de ética; posteriormente, al final de este proceso básico, todo se ponía en práctica a través del ejemplo de los formadores, quienes eran, por entonces, ciudadanos ilustres, altamente respetados por toda la sociedad. Todavía existían el llamado “temor de Dios”, la vergüenza y la honorabilidad, se honraba la palabra, se tenía claro en qué consistía el respeto hacia las personas y hasta se temía al infierno.

En la actualidad, casi todo ha desaparecido, de las familias queda muy poco y las aún bien conformadas –cuyo número va en franco descenso– dedican apenas una mínima parte de su tiempo a educar a sus hijos y compartir con ellos, a cambio de unos pesos de más que les permitan vivir más dignamente y proporcionar a sus hijos una educación de calidad; la religión, al igual que los cursos de civismo y urbanidad, es prácticamente una anécdota hoy en día y no se enseña el respeto porque los mismos docentes no son respetados ni por sus colegas ni por los estudiantes y sus padres, quienes cada vez exigen menos trabajo para sus hijos.

A todo esto hay que sumar que el infierno ya no existe, que ya no le guardamos respeto al Creador y que, además, los mismos formadores son cada vez menos modelos de conducta para los miembros de una sociedad que negoció la honestidad, la integridad y la honorabilidad a través de infinitos grados de “viveza” de los individuos. Así las cosas, la formación en valores

corresponde quizás en su mayor parte a algunos seriados de televisión o a las cadenas noticiosas y de recreación, todas atadas a imperios económicos cuyo único objetivo es incrementar la audiencia y, por consiguiente, sus utilidades.

Tal vez lo más triste es que los mayores escándalos de corrupción, que afectan a un gran número de personas, son protagonizados por profesionales y dirigentes políticos surgidos, en todo el mundo, de los centros educativos de mayor prestigio, de la más alta calidad, de los primeros lugares en los escalafones internacionales, en los que se inculcó todo el tiempo la obligación de adquirir las destrezas y habilidades personales requeridas para sobresalir en un mundo altamente competitivo y para producir resultados a toda costa. Es claro, entonces, que el sistema de educación quedó con una pequeña deuda con todos ellos: su formación en valores, de la cual no da cuenta ningún sistema de calidad, ni se advierte en los lineamientos del BM, ni mucho menos aparece en los planes de desarrollo o en las reformas al sistema hechas por el Estado.

En consecuencia, parecería necesario considerar la posibilidad de reorientar algunos esfuerzos, al igual que concebir un modelo educativo de calidad, cimentado en la calidad humana, con lo cual, estoy seguro, comenzaríamos después de cierto tiempo a tener gobiernos y dirigentes más preocupados por aquellos a quienes dirigen y gobiernan; a disfrutar de obras de infraestructura concluidas y con la calidad por la que se paga; quizás entonces renacerá el respeto por los demás y empezarán finalmente a ceder todos esos índices que se ha pretendido atacar, desconociendo la calidad de los protagonistas de nuestro presente. Si se decidiera lanzar una iniciativa semejante, la primera pregunta que habría que responder sería la siguiente:

Y en este nuevo comienzo, ¿a quién le compete entonces la formación en valores?

Política industrial

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 relación de la industria con la economía no se ha esclarecido. Hirschman proclamó durante años que la industria disponía de vínculos hacia adelante y hacia atrás, pero esto nunca se formalizó ni se concretó en términos económicos. Baumol ha sostenido que la industria tiene mayor capacidad de crecimiento e innovación que el resto de sectores, pero su incidencia sobre el resto de la economía se mantiene en debate. No siempre se advierte que el aumento de la productividad de la industria origina alzas de costos salariales y precios que afectan a todos los sectores. Así, el incremento de la productividad industrial tiene un efecto menor sobre la producción propia y se traslada a todos los sectores de la economía.

La industria está en evidente conflicto con los recursos naturales. Ante el predominio del café, que había conducido a fuertes crisis cambiarias entre la Segunda Guerra Mundial y 1960, se abre camino un espíritu industrialista alentado por el pensamiento keynesiano y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). Se establecen los más variados mecanismos de protección y surgen la Junta Monetaria en 1963 y el Decreto 444 de la administración de Carlos Lleras Restrepo y Abdón Espinosa Valderrama (1967). Ambas normas someten la economía a un severo control de cambios, orientado a conciliar las exportaciones indus-

triales y agrícolas y la sustitución de importaciones. En el gráfico siguiente se observa cómo entre esta fecha y 1990 la participación de la industria en el producto se mantuvo por encima del 20 % y el producto industrial creció cerca o por encima del 5 %.

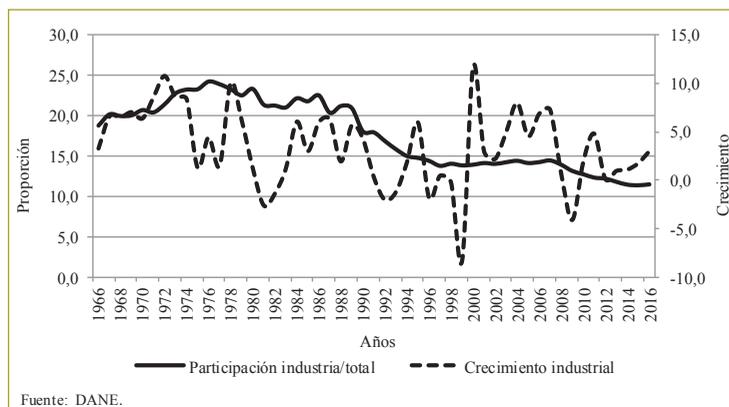


Gráfico 1.

El curso de la historia se cambia en 1991, cuando se establece el banco central autónomo y se introduce la apertura económica dentro del fundamentalismo de mercado. Se desmontan los aranceles, se eliminan los subsidios a las exportaciones y se establece el cambio flotante. Se le dan rienda suelta y amplios incentivos a la inversión extranjera y el control monetario se reduce a la

El desempeño de la industria y el crecimiento económico fueron mucho mejores en la época de intervención del Estado que en la del libre mercado y la competencia.

regulación de la tasa de interés. En este periodo (1991-2016), la participación de la industria en el producto bajó del 20 al 11 % y el producto nacional creció el 3,7 %.

La evolución descrita revela que el auge y el decaimiento industrial no provienen de acciones aisladas y puntuales; por el contrario, son el resultado de la organización económica. El desempeño de la industria y el crecimiento económico fueron mucho mejores en la época de intervención del Estado que en la del libre mercado y la competencia. Los resultados se apartan en forma tajante de las predicciones de la ortodoxia; en los países en desarrollo, la industria no surge del libre mercado y su participación en el producto nacional evoluciona paralelamente al crecimiento económico.

La industria se ha interpretado como un elemento de oferta que dispone de propiedades físicas especiales de expansión. Igualmente importantes son sus propiedades de demanda. En virtud de las condiciones externas, originadas en el alto crecimiento de las manufacturas en el comercio internacional, el sector puede ampliarse más que ningún otro. Ésta, que fue la principal característica de las economías asiáticas, está supeditada a la competitividad, es decir, a la posibilidad de penetrar en los mercados externos.

En fin, la industria dispone de múltiples distintivos que le dan propiedades especiales que no se han precisado. Muchas veces el desarrollo industrial de los países se interpreta como un fenómeno desconocido de la naturaleza. Tanto es así que todavía no se han logrado concretar las razones de su espectacular desempeño en los países asiáticos, incluso en Europa y Estados Unidos, durante dos siglos. En Colombia, a su vez, no se han identificado las razones de las fases de auge y decadencia. Tampoco se sabe por qué la apertura económica, concebida como una fórmula mágica para propiciar la industria y las exportaciones manufactureras, fracasó; más concretamente, resultó al revés. En este sentido,

la industria, más que una selección sectorial arbitraria, es la columna vertebral de una concepción económica general.

Todo esto revela la carencia de una teoría de la industria que sirva de referencia para un diagnóstico estructural y la formulación de políticas.

El artículo consta de cinco partes. En la primera se analiza la evolución de la industria en Colombia y en el conjunto del planeta, de donde se derivan las condiciones de auge y decadencia y de los factores determinantes del desarrollo industrial. En la segunda, la relación entre el sector externo y la industria. En la tercera, la industria como columna vertebral del modelo de crecimiento desbalanceado. En la cuarta, los desafíos actuales de la industrialización, cuando los países desarrollados fortalecen sus estrategias para impulsar los bienes de mayor complejidad de la cadena de producción y concentrarse en aquellos que tienen productividades cuatro veces por encima del promedio. Sobre estas bases se delimitan las características de una política industrial para recuperar el sector. El elemento central es una protección que compense la diferencia de productividad con los países desarrollados y la renegociación de los TLC.

REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Aun cuando es viable, no es deseable el crecimiento del producto total superior al industrial durante varios años como resultó en el país en el periodo 2004-2014, con crecimiento promedio del producto total del 4,8 % y de la industria del 2,9 %. En la actualidad, en plena globalización, la industria está pasando por la tercera revolución (*The Economist*, 4 de octubre de 2014):

- La primera revolución industrial de la segunda mitad del siglo XVIII y primera mitad del siglo XIX se caracterizó por el invento de la máquina de vapor, el desarrollo de los ferrocarriles y los barcos de vapor, así como los avances en la producción de hierro, textiles y confecciones. La primera revolución marca las pautas del surgimiento de las grandes fábricas en Europa y Estados Unidos. En el sector industrial colombiano resulta estratégica su ventaja comparativa en textiles y confecciones para la exportación, y del hierro y acero como insumos para el sector constructor. Entre las empresas de mayor tamaño en Colombia se encuentran las

de textiles (Fabricato, Coltejer y Protela), la de confecciones (Manufacturas Eliot) y la siderúrgica (Acerías Paz del Río).

- La segunda revolución industrial del último cuarto del siglo XIX al primero del siglo XX conllevó el surgimiento de la electricidad, los automóviles y la radio. Aunque los primeros automóviles modernos fueron introducidos a finales del siglo XIX por compañías de Estados Unidos, Alemania y Francia, la industria automotriz se consolidó a comienzos del siglo XX (Scherer, 1996). En lo anterior fueron líderes compañías americanas como General Motors, Ford y Chrysler, como también las compañías de Alemania, Francia, Inglaterra e Italia. El ingreso japonés al mercado automotor fue posterior. En Colombia se ensamblaron los primeros vehículos a comienzos de los sesenta. En la actualidad, las ensambladoras principales son Renault, Mazda y General Motors (Chevrolet).

Simultánea al desarrollo de los automóviles fue la aplicación de la electricidad y la radio, luego de su invención a finales del siglo XIX, con lo cual se generó una revolución en la forma de generar energía para los hogares y en los medios de comunicación.

- La tercera revolución industrial, de finales del siglo XX hasta el presente, ha implicado avances en los procesadores, sensores, computadores e internet. Los primeros computadores personales se empezaron a producir en la segunda mitad de los años setenta. Al comienzo se utilizaban para juegos y programas educativos, pero rápidamente surgió nuevo *software* como los procesadores de palabras. Entre las primeras compañías de computadores personales se encuentra Apple.

Posteriormente, a principios de los ochenta, entraron al mercado IBM y Compaq. Mientras, en 1986, Toshiba lideró el surgimiento de la producción de computadores portátiles. En el proceso de formación del mercado de los computadores portátiles participaron compañías norteamericanas y japonesas, pero para comienzos de los noventa el mercado era controlado principalmente por las primeras. Con la aparición del computador personal se había logrado un gran avance con respecto a los grandes computadores de los sesenta (Scherer, 1996).

El avance en los computadores fue simultáneo al de los procesadores, sensores, *software* y aparatos elec-

trónicos como cámaras fotográficas y celulares. Por su parte, el internet surgió como una aplicación de los computadores, pasando por dos fases: el internet desde el computador y el móvil. Aun cuando Colombia no se destaca en su producción de productos electrónicos, la utilización del internet como instrumento para aumentar las ventas en los negocios se ha generalizado en todos los sectores de la economía.

En la producción industrial, en medio de la globalización mundial, se han diferenciado los países según su desarrollo (alto, medio o bajo). Los de desarrollo alto tienen mayor participación en la producción de bienes de alta tecnología y de lujo; los de desarrollo medio participan más en productos de mediana tecnología, como papel, plásticos y caucho, metálicos y minerales no metálicos; mientras los de desarrollo bajo se especializan en productos alimenticios, maderas y confecciones.

CUANTIFICACIÓN ECONÓMETRICA DE LOS VÍNCULOS INDUSTRIALES

Muchos de los aspectos de la industria se cuantifican y dimensionan con un simple ejercicio econométrico (tabla 1). Por un lado, se establece una relación de los determinantes del producto nacional con la industria incluida (consumo del gobierno, M_3 e inversión). Por otro lado, se incorporan en otra relación los principales determinantes de la industria (producción, producción mundial y tasa de cambio real). Las relaciones se establecen en términos de la diferencia de los logaritmos naturales de las variables, con excepción de la tasa de cambio real, en la cual se considera el componente cíclico. El sistema capta claramente las interacciones y la



Tabla 1

Variable dependiente Método	D.In (producción) MCO3E (ecuación 1)	D.In (industria) MCO3E (ecuación 2)
Constante	0,02 (0,00) ***	-0,03 (0,01) ***
D.In (producción)		0,58 (0,25) **
D.In (industria)	0,35 (0,05) ***	
D.In (producción mundial)		1,18 (0,28) ***
D.In (consumo del gobierno)	0,07 (0,02) ***	
D.In (M ₃)	0,09 (0,02) ***	
D.In (inversión)	0,06 (0,01) ***	
Tasa de cambio real (componente cíclico)		0,04 (0,02) **
Número de observaciones	51	51
R ²	0,8391	0,6207

Los errores estándares son reportados en paréntesis. Los símbolos ***, ** y * indican, respectivamente, niveles de significancia de 1, 5 y 10 %.

Fuente: Cálculos del autor.

dinámica de la industria. De allí resulta que el ingreso nacional impulsa la industria y ésta a su vez eleva el ingreso. El sector que representa el 11 % del producto nacional explica el 35 % del crecimiento del producto.

El hallazgo está asociado con el desempeño de la economía y la industria. El desempeño de la industria está condicionado al ahorro y superávits en cuenta corriente, y ambos factores influyen altamente en el crecimiento. Así mismo, la expansión industrial arrastra toda la economía por la vía de la oferta y la demanda. Se confirma que la industria, más que un sector prioritario, constituye la columna vertebral del sistema económico basado en el desequilibrio; más concretamente, el crecimiento desbalanceado de las actividades con mayor capacidad de expansión.

Se reitera que el máximo crecimiento de la producción no se logra en un marco en que todos los elementos del sistema evolucionen al mismo ritmo. Por el contrario, corresponde a un estado en que el ahorro, la industria y el sector externo evolucionan por encima del promedio. Buena parte de la explicación está en la fuerte complementariedad de la industria con la

economía. El aumento de la productividad industrial induce una baja del precio y un alza de salarios que se trasladan a todo el sistema económico. Es posible que el incremento de la producción industrial dé lugar a una menor participación del sector en el valor agregado y a una reducción aún mayor en el empleo. Esta es la principal propiedad de la industria, pero curiosamente se emplea más para descalificarla. El error proviene de la economía neoclásica, que está montada sobre la sustitución de los bienes y factores. Se da por sentado que el aumento de la producción de bienes ocasionaría una pequeña reducción del precio que induce a consumirlo; la oferta crea su propia demanda y el sistema se mantiene en pleno empleo. La proposición no se cumple en la industria, y tampoco se da en la agricultura (Sarmiento, 2017). El incremento de la producción de ambos sectores da lugar a caídas de los precios más que proporcionales que reducen el ingreso. De este modo, el aumento de la productividad industrial causa una reducción de precios y del empleo, los cuales bajan su participación en el valor agregado y de mayor magnitud en el empleo. Así, las participaciones tanto del valor

agregado como del empleo que se usan para medir la influencia del sector en la economía están totalmente equivocadas, y son más deformadoras de la realidad. La incidencia del sector sobre el conjunto de la economía es mayor que su participación en el producto multiplicado por la productividad.

En las teorías dominantes se presume que la productividad de los sectores se iguala en el margen. Sin embargo, la información directa de los sectores revela grandes diferencias. El mercado no tiene la suficiente fuerza para lograrlo.

Parte de la explicación está en que la sustitución prevista en la teoría de equilibrio no se cumple en la realidad, en particular en la industria y la agricultura. De cierta manera, es una evidencia de que la ley de Say no se cumple y el mercado no conduce a las situaciones más eficientes. Simplemente, no existe la flexibilidad para los precios y la movilidad de los factores para que se presente el ajuste. Cuando las elasticidades y las sustituciones son bajas, se requieren enormes variaciones de los precios para nivelar las productividades. Así, la productividad en precios reales tiende a mantenerse en la industria y la agricultura por encima de los servicios y las *commodities*. En cierta forma, se vuelve a presentar la falla de verificación cuantitativa de las teorías que sirvieron para justificar la existencia y eficiencia del mercado. En el caso de actividades con alto crecimiento de la productividad y baja elasticidad de demanda, se quiebra el equilibrio. Como los precios de la industria y la agricultura no pueden bajar en grandes magnitudes, ambos tienden a operar con productividades mayores que el resto de los sectores.

En síntesis, el sector industrial ha fallado porque no se han dilucidado los efectos del desmonte de la protección en el lento comportamiento en los países en desarrollo ni tampoco se ha avanzado en una teoría sobre los determinantes en estos países y, por lo tanto, en una política coherente para impulsarla.

En trabajos anteriores se han identificado características especiales de la industria que modifican las concepciones tradicionales. Primero, la relación entre el sector externo y la industria es diferente en los países en desarrollo y en los desarrollados. Segundo, el desarrollo industrial no sólo es una simple prioridad sectorial sino la columna vertebral de un modelo basado en los factores de mayor expansión de la economía que surgen dentro de un marco de crecimiento desbalanceado. Tercero, la rápida automatización e innovación impulsada por la alta rentabilidad del capital induce la adopción de tecnologías cada vez más intensivas en capital. Los aumentos de productividad a causa de la sustitución de trabajadores por maquinaria no tienen precedentes.

La teoría de la industria le apostó a la evolución. Durante mucho tiempo se vio como parte de una secuencia que surge luego de la especialización en recursos naturales. No es cierto que la industria resulte del café y la minería. La especialización en recursos naturales significa el sacrificio de las actividades que tienen un mayor incremento de la productividad y mayor capacidad de explotar el aprendizaje en el oficio y las economías de escala. Cuanto más rápido se entre en la industrialización, cuanto mayor su influencia en el desarrollo.

En los países en desarrollo la industria está condicionada a la protección que le permite aprender en el oficio. No existe mejor camino para impulsar la productividad del trabajo.

En síntesis, el sector industrial ha fallado porque no se han dilucidado los efectos del desmonte de la protección en el lento comportamiento en los países en desarrollo ni tampoco se ha avanzado en una teoría sobre los determinantes en estos países y, por lo tanto, en una política coherente para impulsarla.

SELECCIÓN DE LOS SECTORES

La selección de los sectores es la propiedad más importante de cualquier modelo económico. La articulación de los sectores que van adelante y atrás tiene enormes repercusiones en el sector externo, la producción, los ingresos y la equidad. Por mucho tiempo se consideró que los planificadores no tenían los conocimientos para señalar las prioridades sectoriales. Sin mayor base empírica, se dio por sentado que el mercado hace mejor la tarea. Basados en el principio de que la competencia

tiende a igualar la productividad en el margen, se intuyó que el mercado dispone de mejores medios para jerarquizar los sectores. No se advirtió que el principio está muy lejos de cumplirse en la realidad. La teoría de equilibrio general que sirvió de base para la asignación de recursos por la vía del mercado está fundamentada en la alta sustitución o, si se quiere, en altas elasticidades de demanda. Se espera que las variaciones de la producción generen pequeñas reducciones de precios que aseguren la demanda; el sistema tiende a mantenerse en pleno empleo. El comportamiento no es válido en el caso de la industria y la agricultura, que son altamente complementarias. Las variaciones de la producción dan lugar a grandes variaciones de los precios. Así mismo, se encuentra que los productos de mayor ventaja comparativa se pueden elaborar a menores precios con los mismos salarios. Este sistema resultó en una estructura de baja productividad que deja en segundo plano a la industria y la agricultura, que son los sectores de mayor potencial de expansión.



Durante siglos se observaron las ventajas de la industria. En primer lugar, es el sector que tiene mayores vínculos hacia adelante y hacia atrás. La industria es complementaria de la mayoría de los sectores, por no decir que todos. Su ampliación arrastra el comercio, los servicios, la construcción y varias actividades agrícolas. Así mismo, no hay actividad que no suministre insumos a la industria, tal como lo confirman los estudios económicos que muestran que la incidencia de la industria

en el producto nacional es mayor que su participación en el PIB. En segundo término, es el sector que ofrece mayores posibilidades de innovación y aprendizaje en el oficio. En todas las actividades industriales se observa una alta relación entre la experiencia acumulada y la productividad, relación que tiende a ser más estrecha en las actividades de mayor complejidad. En los sectores de computación y comunicaciones se encuentra que la producción se puede duplicar cada dos años y medio. Aún más dicente, no hay otro sector que pueda absorber más el gasto en ciencia y tecnología, que es la actividad más rentable de la economía.

Lo anterior tiene una clara verificación en la observación diaria. Los países que crecen son los que tienen mayor participación de la industria. La mayor expansión de los países se presenta cuando la industria crece por encima del promedio.

La industria tiende a verse como un sector más. No se ha entendido que la industria es la columna vertebral de un modelo que les dé prioridad a los sectores de mayor potencial de expansión, como el comercio internacional y el capital. Así, las economías lideradas por la industria dan mayor productividad efectiva que el modelo de libre mercado, en particular en los países en desarrollo. Sin embargo, no se da en los países en desarrollo en forma silvestre. El mercado discrimina contra la industria y la agricultura.

La industria se caracteriza por la alta productividad absoluta con respecto al resto de los sectores. De este modo, los países industrializados quedan en condiciones de tener mayor productividad y mayor expansión de la producción. Las economías de mayor crecimiento y expansión del comercio son los de mayor participación industrial. En los países en desarrollo sólo elaboran los productos industriales a menores salarios que en los países desarrollados. La asimetría tiende a corregirse a largo plazo por el aprendizaje en el oficio. En la medida en que los productos industriales se produzcan en los países en desarrollo y se asimilen los conocimientos, su productividad aumentaría con respecto a la de los países desarrollados y la falencia desaparecería y se acortaría. Por eso, las multinacionales encontraron que podían reducir los costos de mano de obra adquiriendo los insumos de alta complejidad en los países desarrollados y ensamblándolos en países en desarrollo.

El proceso se sofisticó. Los países desarrollados avanzaron en tecnología y técnicas de producción para

separar los productos que son elaborados con procedimientos rutinarios con mano de obra no calificada y los elaborados con alta tecnificación de mano de obra y alta calificación. Así, los países de mayor desarrollo quedaron en condiciones de especializarse en la industria de alta productividad adquiriendo el resto en los países en desarrollo. Lo anterior se ilustra con cifras conocidas. La participación del trabajo en la industria se desplomó en los países desarrollados y se mantuvo en los países en desarrollo. Aún más dicente, el empleo industrial pasó de 230 a 300 millones entre 1991 y 2014 en los países en desarrollo, mientras que los países desarrollados tienen únicamente 63 millones de empleos industriales generados y contribuyen a las dos terceras partes de la producción mundial. Sin duda, los países desarrollados se quedaron con la industria de alta productividad y complejidad.

En general, no se encuentran grandes diferencias en los agregados macroeconómicos convencionales. Se considera que a largo plazo no hay mayores diferencias. Las discrepancias se presentan en la evolución sectorial. La información comparada de América Latina muestra que en todos los países, con excepción esporádica de Brasil, han operado con superávits comerciales en todos los sectores, excepto en la industria. En el fondo, refleja el freno de la abundancia de tierras y de recursos naturales a la industria. En cambio, en los países del Sureste Asiático y en las economías pequeñas de Europa, que carecen de tierra y recursos naturales por fuerza de las circunstancias, tuvieron que entrar en la elaboración de productos y realización de actividades de alto componente del conocimiento.

En este contexto, la política industrial requiere instituciones de promoción y seguimiento, con mayor énfasis en el comportamiento e interrelación de los sectores. La política industrial, además de propiciar estos estímulos específicos al sector y crear las condiciones para integrarse al conjunto de la economía, debe velar por la consistencia sectorial. Así, las prioridades de la industria no pueden establecerse sin acciones complementarias en el resto de la economía, en particular en la minería y la agricultura.

La gran pregunta es por qué los países en desarrollo no materializan la ganancia de la alta productividad de la industria en el producto nacional. Simplemente, porque no hay demanda por los propósitos industriales. El aumento de la productividad se manifiesta en caídas de

precios que incluso pueden ser más que proporcionales y les significan menores ingresos a las empresas. Es posible que los trabajadores y los capitalistas del sector no tengan ingresos para adquirir los productos del sector y el aumento de la productividad no se manifieste en la demanda industrial. Se presentaría un estado persistente de exceso de oferta industrial.

La manifestación más clara del incumplimiento de la ley de Say se observa en el empleo. El incremento de la productividad industrial ocasiona una reducción de la mano de obra. La participación en el empleo industrial disminuye más que la participación de la producción. La mayor productividad se consigue a cambio de una reducción de los precios y el empleo. La ilustración más crítica se observa en la agricultura. En los últimos 20 años aparece como el sector de mayor aumento de la productividad y menor crecimiento de la producción.

En general, se considera que la industria tiene condiciones muy superiores a las del resto de la economía. El sector tiene una productividad muy superior a la mayoría de los sectores, ofrece los mayores salarios y dispone de mayores posibilidades de penetrar en los mercados internacionales. Cómo es posible, entonces, que el sector con mayor potencial de expansión física y de beneficios no avance rápidamente. La participación de la industria mundial cayó en los últimos 30 años y a diario se acentúa.

La explicación en coro de los economistas neoliberales sería la caída de la productividad física. Supuestamente, las actividades industriales no tienen el impulso del avance tecnológico y la capitalización que aumente la contribución de los trabajadores a las firmas y la producción. Es un simple problema de oferta, como lo señalarían los libros de texto.

La razón es, más bien, que la ley de Say no se cumple. Simplemente, el sector enfrenta serias limitaciones de demanda que no son asimiladas ni corregidas por el mercado. Así, una de las consecuencias incuestionables de la globalización ha sido el retroceso del sector que tiene mayor potencial de expansión. En todos los estudios se encuentra que la caída de la industria es la causa principal del deterioro de la productividad total de los factores (PTF) y el crecimiento económico.

De todas maneras, la relación entre la industria y el comercio internacional es materia de contradicciones. En general, se encuentra que el comercio internacional propicia la expansión de la industria. Los bienes indus-

El conflicto en los países en desarrollo entre el comercio internacional y la industrialización se refleja claramente en la información histórica. La industria asciende en las épocas de protección y decae en las de apertura comercial.

triales son probablemente los más transables. De este modo, la información muestra que la participación en el comercio y la conformación de superávits en cuenta corriente está directamente relacionada con la industria en el producto. Sin embargo, al mismo tiempo se encuentra que los bienes industriales de los países en desarrollo son los de mayor productividad relativa y, por lo tanto, los de menor competitividad externa. La industria parecería ser el privilegio de los países desarrollados. La presencia en los países en desarrollo está condicionada a bajos salarios. En el pasado, significó grandes protecciones que elevaron la inflación y generaron serias ineficiencias en la asignación de recursos. En este sentido, el conflicto no estaría tanto en la industria y el comercio internacional sino en la industria y el libre comercio. Su desarrollo en los países atrasados está condicionado a la protección. Desde luego, las condiciones son distintas en los países desarrollados, donde el sector tiene ventaja comparativa; es decir, su relación de productividad es mayor que en el resto de la economía. Así las cosas, el dictamen de la naturaleza sería que los países desarrollados se especializaran en los bienes industriales y los países en desarrollo en los restantes.

El conflicto en los países en desarrollo entre el comercio internacional y la industrialización se refleja claramente en la información histórica. La industria asciende en las épocas de protección y decae en las de apertura comercial. Así, en Colombia durante el periodo 1967-1990 la industria avanzó por encima del PIB, en tanto que en el periodo 1991-2016 ocurrió lo contrario. ¿En cuál de los dos le fue mejor? Sin duda, en el primero. El PIB y el empleo avanzaron más rápidamente. Es claro

que existe una fuerte relación entre el comercio y la industrialización y entre éste y el crecimiento económico. Infortunadamente, esta relación ha sido deformada y ocultada por la información.

En este punto es claro el conflicto en los países en desarrollo entre el libre comercio y la industrialización. El desarrollo industrial está condicionado a una protección selectiva que contrarreste la baja productividad del sector con respecto a los países desarrollados. En la práctica, se puede lograr con subsidios al empleo. Más aún, se puede dinamizar dentro de un marco de aprendizaje en el oficio. En un principio, se favorecerían las actividades de ventaja comparativa y a medida que aumente su productividad se trasladaría a otras actividades de mayor productividad, hasta cubrir la totalidad del espectro industrial.

Estamos ante el hallazgo más importante de la teoría de asignación de recursos. Cuando las demandas de los sectores de mayor productividad son inelásticas, el mercado no conduce a la solución más eficiente. Los agentes económicos prefieren invertir en sectores en los que pueden apropiarse más fácilmente los beneficios. Así, los servicios y las *commodities* tienden a tener una participación mayor en términos nominales. La economía se traslada o se especializa en las actividades de menor productividad absoluta. Los bienes transables se adquieren en el exterior. La productividad de la canasta de bienes destinados al mercado interno tiende a decaer o estancarse.

En Colombia, en términos de los subsectores industriales, en los de alta tecnología se destacan la baja participación de la producción y las exportaciones, y las considerables importaciones, en productos informáticos, electrónicos y ópticos; equipo médico y odontológico; otros tipos de equipo de transporte y maquinaria de uso especial. Se confirma que Colombia no tiene ventaja comparativa en los productos de alto contenido tecnológico. En cambio, los países desarrollados alcanzan altos ingresos y salarios por su productividad absoluta en la producción de estos bienes.

En este punto se aclara o se plantea el dilema entre libre mercado e industrialización. El libre mercado conduce a una especialización en favor de los productos de mayor demanda y mayor productividad relativa. En la práctica, están representados por las *commodities* y los servicios. La industria y la agricultura quedan en segundo plano. En cambio, una política industrial que

contrarreste las diferencias de productividad relativa daría lugar a una canasta de producción de mayor PTF. El país estaría en condiciones de producir bienes con apoyo tecnológico y elevación de la proporción de la fuerza de trabajo para pasar de la habilidad de juntar metales a innovar y pensar.

Los beneficios de la productividad absoluta son permanentes y se manifiestan en la canasta de bienes elaborados usualmente en la PTF. En cambio, los beneficios por intercambio se manifiestan en menores precios y se dan por una sola vez. En este sentido, la diferencia de productividad absoluta con los servicios es a más largo plazo que la diferencia en las actividades transables con respecto al resto del mundo. Se corrobora que los beneficios por el intercambio son por una sola vez.

La contribución de los sectores a la producción puede inferirse con la productividad. Cuanto mayor la producción por trabajador, tanto mayor la contribución a la producción. En este sentido, la industria tendría una clara ventaja con respecto al resto de los sectores. Sin embargo, el efecto no lo capta el mercado por la baja elasticidad de la demanda. Los trabajadores y los empresarios no perciben los beneficios del aumento de la productividad, por lo cual preferirían desplazarse a sectores en los que pueden apropiarse de los beneficios. Aún más dramático, los aumentos de la producción dan lugar a caídas de precios e incremento de salarios que se trasladan a otros sectores.

Beneficios del comercio

La industria en los países en desarrollo enfrenta el dilema del sector de mayor productividad absoluta y el de menor productividad relativa. La adquisición de los bienes en el exterior da una ganancia de intercambio y una pérdida porque el empleo genera más producción en la industria que en las actividades de los no transables como los servicios y los bienes intensivos en recursos naturales. Así, en la medida en que se producen más bienes industriales, se pierde la ganancia por intercambio y se gana el efecto de demanda porque la productividad de la mano de obra es mayor en las exportaciones y en la sustitución de importaciones que en el mercado interno. Como la industria y los servicios son complementarios, el incremento de la producción industrial destinada al mercado externo aumenta el ingreso nacional cuando la diferencia de la productividad con los servicios es

mayor que la diferencia de productividad de los mismos bienes con el exterior. La proposición correcta es que el bienestar aumenta cuando la diferencia entre la productividad absoluta entre industria y servicios es mayor que la diferencia entre la productividad entre la industria nacional y la industria de los países socios.

Lo anterior es simple en términos de palabras. La producción industrial óptima se da cuando el efecto de demanda es mayor que el efecto de oferta, es decir, cuando la diferencia entre la productividad de la industria con respecto a los servicios es mayor que la diferencia de productividad con respecto al mismo producto en el exterior. El primer efecto se puede inferir por los superávits en cuenta corriente multiplicados por la diferencia de productividad de la industria y los servicios, y el segundo, por la reducción de los aranceles.

En las teorías dominantes de comercio internacional se considera que los beneficios están en la especialización de los productos de ventaja comparativa, es decir, en los bienes de mayor productividad relativa. En los productos individuales, o si se quiere en la industria, la ganancia está en adquirir el producto en el exterior a menores precios. En los países, el efecto podría medirse en términos de los aranceles. Así, en el caso de Corea, que redujo los aranceles en 50 % de las importaciones que representaban el 30 % del PIB, la ganancia de intercambio fue el 15 % del PIB de un año por una sola vez. Esta cifra no corresponde ni al 5 % de los beneficios que recibió la economía durante los 30 años de crecimiento impulsado por la expansión de las exportaciones. El efecto no contribuyó al mayor crecimiento en más de 0,5 % anual.

Colombia, donde la participación de las importaciones era ligeramente menor (20 %) y los aranceles se redujeron en una cuantía similar, la contribución al crecimiento durante los 25 años de apertura no fue más del 0,3 % anual. Si a esto se agrega la monumental revaluación entre 1991 y 2014, el efecto no pasaría del 0,5 %.

Entonces, dónde están las ganancias del comercio. En el factor que denominamos en este artículo y en libros anteriores el efecto de demanda, que proviene de la mayor productividad de la canasta de bienes transables con respecto a los no transables. En el caso de la industria, estaría representada por la diferencia de productividad absoluta con respecto a los servicios. En términos globales, estaría medido por el aumento del superávit de la balanza de pagos multiplicado por la

diferencia de productividad entre la canasta de bienes transables y no transables.

Volvamos al caso del milagro de los tigres asiáticos. En general, se observa que los países que tenían déficit pasaron a operar con superávits de 5 a 10 % del PIB. El efecto de demanda estaría dado por este porcentaje, multiplicado por la diferencia de productividades entre bienes transables y no transables.

En la teoría convencional, se considera que todos los bienes son transables. En el caso del ejemplo del libro de texto de dos bienes, se supone que cada país produce y exporta un bien. Así, los beneficios del comercio están en la adquisición de los bienes a precios menores en los mercados internacionales. En Sarmiento (2017) se reitera que este efecto se refleja en las importaciones y es la principal contribución del comercio a la producción y, en general, a la economía. Es más, a lo largo del artículo se muestra que el efecto sobre las exportaciones es de menor orden.

Las cosas son muy distintas cuando se reconoce la existencia de bienes no transables, que representa ni más ni menos el 70 % del consumo. El aumento de los bienes transables genera un efecto adicional al del intercambio, como es el de su mayor productividad con respecto a los no transables. En este contexto, los beneficios del comercio internacional están dados tanto por el efecto de intercambio como por el efecto de demanda. El primero se origina en la productividad relativa y el segundo, en las productividades absolutas. Supongamos que como consecuencia de la apertura comercial, o cualquier otro evento, aumenta la producción de bienes transables o mejor, concretamente, se incrementa de la producción industrial. La operación significa una pérdida de ingreso por dejar de adquirir un bien en el exterior con menor precio y un efecto de demanda ocasionada por la mayor productividad de los bienes transables con respecto a los no transables.

Curiosamente, los comportamientos son distintos en los países en desarrollo y desarrollados. En ambos, la industria tiene un efecto de demanda positivo; la productividad de la industria es mayor que la de los bienes no transables. En cambio, el efecto de intercambio es positivo en los países desarrollados y negativo en los países en desarrollo. Así las cosas, los efectos son positivos en los países desarrollados y en dirección contraria en los países en desarrollo. Esta es la verdadera diferencia de la industria con el resto de sectores, y en general de

los bienes transables en los países desarrollados y en desarrollo.

Por eso, la industria tiene serias limitaciones en los procesos iniciales de desarrollo, avanza mucho más rápido en los países desarrollados y ha acentuado las diferencias entre naciones. Por eso, las políticas de la Organización Mundial del Comercio (OMC) y de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), que le dan tratamiento similar al sector en los países desarrollados, han impedido que las ventajas del sector se aprovechen en los países de menor desarrollo. Por eso, los TLC les dieron mayor impulso a los países desarrollados.

La experiencia mundial de los últimos 25 años revela que el efecto de demanda es mayor que el efecto de intercambio. En tales condiciones, se vuelve a la vieja teoría que planteaba que los beneficios del comercio estaban más en las productividades absolutas que en las relativas, contrariando la teoría dominante de los últimos 200 años.

La explicación está en el modelo de industrialización montado en el elevado ahorro y los superávits en cuenta corriente. Este modelo les significó a los países del Sureste Asiático crecimientos del producto de 10 % durante 30 años. Les permitió avanzar en 40 años lo mismo que Europa y Estados Unidos en 200 años. Pero ¿cómo es que los superávits en cuenta corriente generan mayores beneficios que el intercambio? Simplemente, la productividad de bienes industriales, incluso los agrícolas, son cinco veces mayores que las de los bienes no transables. La prueba está en las cifras globales de la economía mundial. Los países desarrollados con el 20 % del empleo se apropian del 75 % de la producción mundial. De allí se desprende que la productividad de la industria es entre cinco y diez veces más que la del promedio de la economía. Por eso, un superávit en cuenta corriente entre 5 y 10 % puede generar un crecimiento anual de más de 3 %.

El tema se trata en libros anteriores en forma más abstracta. En general, los beneficios del comercio están tanto en la productividad relativa como en la productividad absoluta, y se recomienda incorporar los dos conceptos en la selección de los sectores. Sin embargo, la información recolectada a escala mundial amplía las luces en el caso de la industria. En este sector, el efecto de productividad absoluta tiende a ser mayor por la altísima productividad de la nueva industria de los países

desarrollados, con base en los componentes de mayor contenido tecnológico y productividad. Al parecer, dicha productividad es diez veces mayor que la de las partes rutinarias, como el ensamble, elaboradas en los países menos desarrollados.

Crecimiento desbalanceado

En el modelo convencional el capital y el producto crecen al mismo ritmo, la productividad de los sectores tiende a igualarse, las importaciones crecen por encima de las exportaciones y la diferencia se financia con inversión extranjera. La economía tiende a un crecimiento ligeramente superior al empleo y al avance tecnológico, en tanto que la influencia del capital es marginal. Las economías crecen al 3 % en condiciones regulares, 4 % en bonanza y 2,5 % en condiciones de destorcida externa.

En la realidad, se observa que el retorno del capital supera la tasa de crecimiento del producto. En la mayoría de los países, el capital crece por encima del producto.

La influencia del crecimiento desbalanceado se puede sintetizar con la expresión que incluye el crecimiento del capital, la PTF y el aumento del empleo¹. El comercio internacional se manifiesta en la PTF y en las ganancias de intercambio, que no aparecen en forma explícita en la ecuación. Sin embargo, esto no representa más del 0,3 % del crecimiento del PIB. Por su parte, los beneficios de la innovación no superan el 0,6 %. El mayor impacto proviene del factor de expansión inducido por la industrialización, que corresponde a la diferencia de crecimiento entre el capital y el producto. En Colombia, representa el 2 % del crecimiento del país y en los países del Sureste Asiático ha llegado al 5 %.

La expansión de la oferta productiva depende principalmente del crecimiento del capital, que no se da en forma aislada. Está condicionada a la alta productividad de la industria y el aprendizaje en el oficio que permitan avanzar en actividades cada vez más complejas. Por otro

$$1. \quad G(Y) = \frac{\partial}{1-\partial} G\left(\frac{K}{Y}\right) + PTF + G(L) \\ G(Y) = G^D$$

Donde $G(Y)$ crecimiento del producto, K/Y relación capital-producto, $G(L)$ crecimiento de la población, PTF crecimiento de la productividad combinada del capital y el trabajo, G^D crecimiento de la demanda.



lado, se requiere una demanda vigorosa que sostenga la producción mediante el superávit en cuenta corriente que, a su turno, depende del ahorro, y de un marco interno que armonice el ingreso nacional con el gasto. De esta manera, el peso del sistema recae en el ahorro, que afecta tanto la oferta como la demanda. No es fácil sostener altas tasas de crecimiento sin una tasa de ahorro del 30 % del PIB.

Es claro que la industria es parte y líder de un modelo de desequilibrio que reconoce que las actividades de la economía operan con posibilidades distintas de expansión. El capital crece por encima del producto y éste por encima del crecimiento de la población y el avance tecnológico. La industria y la agricultura son las actividades de mayor productividad de la economía. La demanda externa, representada por los bienes transables, crece más que el promedio.

Nada de esto es nuevo. Ante la tendencia declinante de la productividad media del capital, los países desarrollados están orientando la investigación tecnológica para aumentar la productividad del trabajo. El primero ha sido quebrar la cadena productiva y separar los componentes del producto final. Esto se realiza en los países de mayor productividad individual y no del conjunto. Se sacrifican las economías de complementariedad por las ganancias del comercio. El mayor esfuerzo se realiza en el diseño de los componentes. Así, los países desarrollados elaboran la parte de mayor complejidad e intensiva del capital y dejan que los insumos de menor complejidad e intensidad de mano de obra se elaboren en los países en desarrollo. Por su parte, los países en

En las concepciones de equilibrio, las ventajas y beneficios de los sectores se originan en sus características propias. En la visión de desequilibrio, dependen más de sus interrelaciones con la economía.

desarrollo se especializan en las actividades de menor complejidad. La mano de obra queda relegada cada vez más a bienes rudimentarios.

Se ha configurado un marco totalmente distinto de la teoría neoclásica. La relación capital-producto sube y el retorno de capital supera el crecimiento del producto. La diferencia sólo se puede contrarrestar con un aumento del ahorro del capital.

En las concepciones de equilibrio, las ventajas y beneficios de los sectores se originan en sus características propias. En la visión de desequilibrio, dependen más de sus interrelaciones con la economía. La ventaja de la industria no está tanto en la gestión interna como en la complementariedad con la mayoría de los sectores y con el conjunto de la economía. Así, su mayor productividad no se manifiesta tanto en la producción del sector como en el alza del salario y el desplazamiento del empleo calificado a otras actividades. Por eso, la contribución del sector es mucho mayor que su participación en el producto. En este sentido, las ventajas de la industria dependen en buena medida de un marco institucional que permita el desarrollo de las complementariedades, como ocurre con el ahorro y el superávit en cuenta corriente. De esta manera, se consigue que el efecto dominante sobre el comercio internacional sea más la contribución de la demanda y la productividad absoluta que el intercambio. Se configura así un círculo virtuoso, en el que la industria y el producto nacional se refuerzan.

En el trabajo de Arrow y Debreu de equilibrio competitivo se encuentra que el sistema tiende a un estado en que las ofertas y demandas se igualan en todos los mercados y dan lugar a la máxima eficiencia (producción). En las formulaciones célebres de crecimiento de Ramsey, Solow, Koopmans, Lucas, Barro y Sala-i-Martin, las economías tienden a un estado en que el producto y el capital crecen al mismo ritmo y el

retorno del capital (r) y el crecimiento del producto (g) se igualan. La realidad es muy distinta. La demanda de dinero puede superar la oferta; de acuerdo con la ley de Walras, en algún sector debe aparecer un exceso de oferta, lo mismo que el conjunto del sistema. La solución es ineficiente. Lo mismo ocurre con el estado en que el capital crece por encima del producto y el retorno del capital supera el crecimiento del producto. Por lo demás, el mercado discrimina contra las actividades de mayor productividad y elasticidad de demanda, como la industria y la agricultura. En los países en desarrollo, el comercio favorece a las actividades de ventaja comparativa que enfrentan limitaciones de demanda. No es necesario entrar en detalle para advertir que el sistema opera en desequilibrio. La eficacia y la máxima producción están condicionadas a la intervención del Estado.

Innovación y automatización

En el fondo, las oportunidades de la industria no cambiaron en medio siglo. La principal diferencia es que ahora la parte elemental se elabora en los países en desarrollo y la compleja en los países desarrollados. Las interrelaciones que antes se producían entre los países dejaron de existir. El costo y la competitividad de los productos se consiguieron con una estructura discriminatoria. Antes, los bienes industriales se elaboraban en su totalidad en los países de origen; ahora, se descomponen y las partes se adquieren en el lugar más barato. Los países encontraron que la competitividad industrial resulta de adquirir las partes rudimentarias en los países en desarrollo para evacuar los costos laborales.

En el pasado, los países desarrollados elaboraban todas las partes del proceso industrial con menores diferencias de salarios y los países en desarrollo participaban con grandes tarifas de protección. Ahora los países desarrollados realizan únicamente las partes de alta complejidad y el resto lo adquieren con menores precios en los países en desarrollo.

El cambio es claro. La industria es la misma de hace 50 años. La diferencia es que antes las partes del producto se originaban en su mayor parte en el país de origen, en tanto que ahora tienden a realizarse en su mayor parte con insumo importado. Así, los países desarrollados se especializan en la crema de alta productividad y los países en desarrollo en los sobrantes. Los mayores ganadores son los países desarrollados, que se quedan con el mayor valor agregado del sector.

En el pasado, la mayor parte de los componentes industriales se elaboraban en el país de origen. Los países desarrollados elaboraban las partes con diferencias mayores y los países en desarrollo lo hacían con niveles muy inferiores de salarios para compensar las diferencias de productividad. El propósito se buscaba con devaluaciones que generaban presiones inflacionarias. En muchos casos, como en América Latina, se iba más lejos acudiendo a aranceles y subsidios que buscaban aminorar la reducción de salarios, limitando la baja de los costos laborales a los productos que efectivamente se convertían en exportaciones y sustitución de exportaciones. De todas formas se requerían grandes diferencias de salarios, subvaluaciones de la tasa de cambio y fuertes protecciones para sostener la competencia de los países en desarrollo.

Hoy en día, las diferencias se han acentuado por la separación entre la industria de alta tecnología y la industria rutinaria. La investigación tecnológica se ha orientado a encontrar formas para desintegrar los productos y adquirir las partes en el exterior. Los países de menor desarrollo estarían o continuarían condenados a producir los bienes de menor complejidad a salarios ínfimos o con acciones abiertas fuera del mercado.

Los TLC han sido pieza clave en esta estrategia tecnológica para quebrar la cadena productiva y separar los componentes de los productos finales. Algunos países, los más neoliberales, han procedido a sustituir los gravámenes progresivos al ingreso y el capital por el IVA para reducir los precios de las materias primas. Así, los países han quedado en condiciones de adquirir las importaciones a precios muy inferiores a los internos. De este modo, el aumento de las importaciones da lugar a una reducción de costos que incrementa la productividad del trabajo. El empleo industrial tiende a evolucionar por debajo de la producción y el valor agregado.

Elementos centrales de la política industrial

Los elementos centrales de una política industrial deben orientarse a corregir los sesgos de los mercados interno y externo contra la industria, moderar los excesivos estímulos de la minería tanto exógenos como endógenos, y crear las condiciones macroeconómicas de balanza de pagos, ahorro y sectoriales que permitan que la industria avance por encima del promedio de la economía.

En los estudios históricos es claro que la industria tiene una diferencia significativa de productividad con respecto a los países desarrollados y crece con la complejidad de los bienes. Los productos industriales tenderán a elaborarse en los países desarrollados. La desventaja sólo se puede subsanar con subsidios que reduzcan los costos salariales. El primer paso sería un subsidio del 50 % del salario para las empresas que amplíen la planta de personal.

La protección industrial debe contrarrestar la menor productividad de los países en desarrollo y propiciar el proceso de aprendizaje en el oficio. Para tal efecto, se debe disponer de una amplia información sobre la facilidad de producción de los bienes, su estado de progreso nacional y sus posibilidades de penetrar en los mercados internacionales. Sobre estas bases se podría establecer un arancel del 20 % durante ocho años para el grupo de bienes de mayor facilidad de elaboración que no se producen en el país. Al cabo de este tiempo, el arancel se trasladaría al siguiente grupo hasta cubrir la totalidad del espectro industrial. El mayor costo se compensaría con exenciones a los gastos de materias primas realizadas internamente y con un mayor IVA para los productos de alto contenido importado.

La experiencia histórica y la teoría macroeconómica dejan un claro conflicto entre el mercado y la industrialización de América Latina. En los últimos 50 años todos los países de la región, con la excepción esporádica de Brasil, han operado con déficits comerciales. Los servicios y la minería han surgido como el camino más fácil de expansión. En contraste con los países del Sureste Asiático, al igual que los países pequeños de Europa, la mayoría de las naciones muestran déficits de recursos externos en la minería y la agricultura. La industria basada en el conocimiento emerge como el único camino de sobrevivencia.

La experiencia histórica y la teoría macroeconómica dejan un claro conflicto entre el mercado y la industrialización de América Latina. En los últimos 50 años todos los países de la región, con la excepción esporádica de Brasil, han operado con déficits comerciales.

El ahorro constituye la principal variable del desarrollo. Las elevadas tasas de ahorro significan mejores salarios, superávit de la balanza de pagos y alta inversión en la industria. La gran dificultad es que no surgen del mercado. La tasa de ahorro es muy poco sensible a la tasa de interés, y en mayor grado en los países de menor desarrollo. La elevación del ahorro depende de la intervención del Estado. El camino fácil de deprimir los salarios ha generado un conflicto entre el crecimiento y la distribución del ingreso. La conciliación de los dos objetivos está condicionada a una elevación del ahorro del capital y se puede materializar con una estrategia de moderación de los márgenes financieros, la extirpación de las pirámides financieras en el amplio sentido de la palabra y, sobre todo, con el freno a la salida de capitales y una fuerte sanción a la ocultación de patrimonios.

El vínculo entre el superávit en cuenta corriente, la industria y el crecimiento económico observado en los estudios de países y comparaciones internacionales constituye el hallazgo de mayor significancia de la macroeconomía a largo plazo, o si se quiere de la estabilidad y el crecimiento. El fuerte vínculo no aparece en las teorías de equilibrio que establecen que las economías deben operar con tasas de cambio sobrevaluadas para propiciar la inversión extranjera y el endeudamiento externo, y lo peor, especializarse en las actividades de mayor productividad relativa, tales como las actividades intensivas en recursos naturales, la agricultura tropical y los servicios. En cambio, aparece como un comportamiento natural en las economías en desequilibrio, donde no se cumplen la ley de Say ni el equilibrio competitivo general.

En esas condiciones, emerge un fuerte vínculo entre el crecimiento y la industria originado por la fuerte complementariedad entre ésta y la mayoría de los sectores y con el sistema en conjunto. La demanda industrial es propiciada por los bienes de mayor productividad absoluta y complejidad, que en los países en desarrollo son los de menor productividad relativa. En la práctica, sería sustentada por la protección escalonada y subsidios para reducir los costos laborales. Por eso, el superávit de la balanza de pagos está directamente relacionado con la complejidad y diversidad de la estructura comercial.

La otra parte de la demanda es el mercado interno, que proviene del alto crecimiento económico que acentúa el dinamismo propio de la industria. No es algo que proceda del mercado y el equilibrio, en el que

la estabilidad de la balanza de pagos y el máximo crecimiento resultan de la tasa de interés y la flexibilidad cambiaria. La armonización no es posible dentro del procedimiento de inflación objetivo basado en la trilogía de la tasa de cambio flexible, balance fiscal y autonomía del banco central para fijar la tasa de interés. Por el contrario, requiere una amplia intervención del Estado en la coordinación de la política fiscal y monetaria, la intervención en el tipo de cambio y la operación con presupuestos desbalanceados.

En los últimos años, en parte como consecuencia de la elevada rentabilidad del capital, se observa una tendencia generalizada a sustituir la mano de obra por capital mediante la automatización y la innovación. En las áreas de alto conocimiento, como en internet y comunicaciones, se consigue aumentando la productividad de un año a otro en 30 %. Como no hay demanda para el aumento de la productividad, la producción crece menos y la mano de obra desempleada se desplaza a las actividades rutinarias. El comportamiento no tendría mayor dificultad si el ahorro y la demanda aumentaran para que la economía absorba la mayor productividad. En tales condiciones, la automatización y la innovación traerían un mayor crecimiento sin mayor traumatismo. En el fondo, se trata de fenómenos menores que, bien tratados y anticipados, no deben generar mayores problemas y se pueden incorporar a la economía con un manejo macroeconómico anticipado.

Algo que se ha aprendido de la experiencia industrial es la importancia sectorial. En las teorías de equilibrio se enseña que las productividades tienden a igualarse y que en el margen todos los sectores son iguales. Ninguna criatura está en condiciones de escoger los sectores más adecuados que el mercado. Nada de esto es cierto. La productividad del trabajo y el capital muestran grandes diferencias entre sectores. En economías con alta complementariedad (bajas elasticidades-precio e ingreso) las productividades no logran igualarse. En consecuencia, la intervención del Estado en la prioridad de los sectores redundaría en mayor eficiencia y producción. La tarea debe hacerse con una política fiscal y laboral, y hasta donde lo acepte la OMC con instrumentos comerciales.

La industria requiere un tratamiento especial. Su desarrollo está condicionado a una acción interna en el sector y en el conjunto de la economía. Por un lado, necesita una protección interna y externa para contrarrestar los sesgos del mercado contra la industria. Por

otro lado, es indispensable un marco de intervención en toda la economía para sacar ventaja del potencial de la industria y de la complementariedad con la mayoría de los sectores, como la aplicación de políticas financieras para elevar el ahorro del capital y políticas comerciales para conformar una estructura productiva de alta demanda interna y externa. En fin, habría que avanzar en una política industrial que, menos que un procedimiento para seleccionar un sector, debe ser un medio para propiciar un modelo de crecimiento desbalanceado, donde el producto industrial, el capital y el comercio internacional crecen más rápidamente que el promedio.

CONCLUSIONES

El libre mercado constituye una fuerte restricción para la conformación del modelo de crecimiento desbalanceado. El mercado da lugar a salarios superiores a la productividad del trabajo, elevado consumo sostenido por la inversión extranjera y balanzas de pagos deficitarias. Los tres factores llevan a que el camino más fácil sea el predominio de los servicios, el elevado consumo, la conformación de estructuras externas de baja complejidad y déficits financiados con inversión extranjera. Sin duda, el aspecto más limitante ha sido la baja demanda por los bienes de ventaja comparativa de los países en desarrollo. La industria está condicionada a bajos salarios en relación con el resto del mundo para compensar la baja productividad. La distorsión se puede compensar por la protección que permite anticipar el futuro que no puede ver el mercado. Un sistema basado en la protección por los productos de mayor productividad constituye la solución más eficiente. La solución resulta de la historia que muestra que la productividad aumenta en un principio y luego tiende a disminuir.

La política industrial no es un simple medio para estimular las empresas manufacturadas. Sin duda, es el corazón de un complejo sistema de desarrollo para alcanzar altas tasas de crecimiento. En el fondo, es un reconocimiento de que hay mejores caminos que el libre mercado para emplear los recursos y extender los beneficios a toda la población. Es la aceptación de que el crecimiento no sólo se logra por equilibrio sino mediante el aprovechamiento de las actividades con mayor capacidad de expansión. Por lo demás, subsana las deficiencias de las teorías de crecimiento que actúan

sobre la oferta y dejan la demanda al arbitrio del mercado. Sus elementos centrales son la alta productividad del trabajo, el elevado crecimiento del capital y el ahorro y la conformación de superávits en cuenta corriente. Las principales limitaciones de la industria son la baja elasticidad de demanda, la baja productividad relativa de las actividades de ventaja comparativa y el bajo ahorro.

El resultado más sobresaliente y práctico de la teoría del crecimiento es la relación entre la producción y la productividad del trabajo. En las formulaciones de Arrow, Solow, Koopmans y Lucas se parte de funciones en que la producción la determinan el capital y la tecnología. En todos ellos se encuentra que el crecimiento del producto depende del ahorro y el avance tecnológico, y que la productividad está dada por las mismas variables. Sin embargo, están lejanos de reconocer la relación con la demanda. Cuanto más débil la demanda, tanto menor la incidencia de la productividad potencial del trabajo sobre el crecimiento económico. La simetría total sólo se presenta en el evento de que la oferta crea la demanda, lo cual corresponde a un caso especial. No hay garantía que resulte de las fuerzas de la competencia y el mercado. Precisamente, el gran desafío del desarrollo es crear las condiciones que garanticen que la productividad del trabajo tenga compradores.

La igualación sólo se da en condiciones de tasa de interés positiva y total flexibilidad de precios. En condiciones de tasas de interés cero y déficit en cuenta corriente, el resultado está condicionado a la alta intervención del Estado mediante la política fiscal y monetaria.



En este contexto, la máxima productividad del trabajo requiere la intervención del Estado para alcanzar tanto la mayor productividad potencial como para generar la demanda que la sostenga. Así las cosas, la máxima producción sólo puede lograrse dentro de un marco de planeación que actúe sobre variables diferentes.

En las teorías convencionales se considera que el mercado por la vía de las tasas de interés está en condiciones de armonizar la balanza de pagos y la igualdad macroeconómica. En los países con déficit en cuenta corriente la tasa de interés bajaría y la devaluación aumentaría, en tanto que en los países con superávit ocurriría lo contrario. El mecanismo de ajuste no tiene ninguna viabilidad en un mundo de tasa de interés cero y baja respuesta de la balanza de pagos a la tasa de cambio. Es precisamente lo que está ocurriendo en las circunstancias actuales. La productividad del trabajo es baja en los países en desarrollo por el reducido ahorro y el déficit en cuenta corriente, y en Estados Unidos por la baja demanda.

El resultado ha sido un exceso de ahorro mundial y tasa de interés cero que mantiene la economía por debajo de su potencial. La solución sería una tercera instancia que indujera a Estados Unidos a ampliar el déficit fiscal para reducir el ahorro y a los países en desarrollo a elevar el ahorro y adoptar marcos comerciales superavitarios y estructuras productivas de mayor complejidad.

Las condiciones económicas excepcionales de la industria no surgen del mercado ni de la competencia. No se cumplen las propiedades mágicas de la ley de Say ni el equilibrio competitivo. Se requiere la presencia activa del Estado en el ahorro, el comercio internacional y la consistencia macroeconómica para impulsar la productividad, ampliar la demanda y fortalecer los vínculos sectoriales y globales. A continuación se sintetizan los elementos centrales de la política industrial que configuran al sector como la columna vertebral del crecimiento desbalanceado:

1. Proteger a la industria mediante subsidios a la contratación de nuevos trabajadores, arancel del 20 % a los sectores de mayor facilidad de producción que no se elaboran en el país y compensación de los aranceles mediante mayores exenciones tributarias a los gastos de materias primas elaboradas internamente.
2. Elevar el ahorro del capital por medio de la regulación financiera, freno a la salida de capitales,

aplicación de gravámenes progresivos al ingreso y al capital y aumento de la eficiencia del gasto público.

3. Construir una amplia información de las facilidades de elaborar los productos, condiciones internas de producción y acceso a los mercados internacionales.
4. Avanzar en instituciones con criterios sectoriales. Las acciones sobre la industria deben tener en cuenta la evolución y el estado de todos los sectores. La nueva información requiere un mayor esfuerzo de presentación de las cifras del DANE.
5. Adoptar un marco monetario basado en el control de tipo de cambio, la coordinación fiscal y monetaria y el control directo de la tasa de interés. Adicionalmente se debe seguir un manejo anticíclico que contemple las fluctuaciones de los productos básicos; el déficit fiscal debe aumentar en las épocas de bonanza y disminuir en las destorcidas.
6. Renegociar los TLC concebidos como una forma de adquirir los componentes de los productos en el exterior. Mientras tanto, convendría aplicar los instrumentos fiscales y financieros para contrarrestar la tendencia generalizada de los países para sustituir la tributación directa por IVA.
7. Implementar una política de estímulo a la educación, tendiente a sustituir las habilidades manuales de los trabajadores por habilidades basadas en el conocimiento.

REFERENCIAS

- Arrow, K. & Debreu, G. (1954). Existence of equilibrium for a competitive economics. *Econometrica*, 22.
- Baumol, W. (1986). Macroeconomics of unbalanced growth. *American Economic Review*, 57.
- Hausmann, R. & Hidalgo, C. A. (2011). *The atlas of economic complexity*. Cambridge: The MIT and University Press.
- Hirschman, A. (1958). *The strategy of economic development*. New Haven: University Press.
- Koopmans, T.C. (1965). On the concept of optimal economic growth. Cowles Foundation Discussion Paper. 163. Recuperado de <http://cowles.econ.yale.edu/P/cd/d01b/d0163.pdf>.
- Nordhaus, W. (2006). *Baumol diseases: a macroeconomic perspective*. NBER.
- Piketty, T. (2014). *Capital in the twenty-first century*. Cambridge: Harvard University Press.
- Sarmiento, E. (2014). *Distribución del ingreso con crecimiento es posible*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sarmiento, E. (2017). *Lecturas sobre producción, capital y salario. Bases para una nueva teoría*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Scherer, F. M. (1996). *Industry, structure, strategy and public policy*. Harper Collins.
- The third great wave* (octubre de 2014). *The Economist*.

Calidad del agua en las cuencas de los ríos Torca, Salitre y Fucha para la evaluación regional del agua (ERA)

Water quality in the basins of rivers Torca, Salitre, and Fucha for regional water assessment (RWA)

YULY ANDREA SÁNCHEZ LONDOÑO

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

yuly.sanchez@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/02/2017 Aceptado: 15/03/2017

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

Resumen

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

Los resultados se compararon con la normativa vigente de objetivos de calidad nacional y de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), y se encontró que la calidad del agua de las cuencas urbanas, como Torca, Salitre y Fucha, tiene un índice de alteración potencial de contaminación alto, debido al elevado valor de DBO_5 y DQO de los factores poblacional e industrial.

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

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

Abstract

This article shows the results of the study performed for Regional Water Assessment (RWA) by the Water and Sewage Company of Bogota (EAB in Spanish) in the basins of rivers Torca, Salitre, and Fucha, wherein monitoring points were selected to estimate the values of Water Quality Index (WQI) and Water Quality Potential Alteration Index (IACAL in Spanish).

The results are compared with current regulations for quality objectives at the national and district level, finding that water quality in urban basins, such as Torca, Salitre, and Fucha, has a high IACAL due to the elevated number of BOD_5 and COD in population and industrial factors.

Estimating the water quality indices of RWA led to state the current state of water quality in the river basins.

Keywords: Quality, RWA, WQI, IACAL.

INTRODUCCIÓN

La determinación de la calidad del agua de las cuencas de estudio corresponde a los ríos Torca, Salitre y Fucha, desde su nacimiento en los cerros orientales hasta su confluencia en el río Bogotá.

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

Para calcular los indicadores se consultaron redes de monitoreo de cada una de las cuencas, con el fin de establecer los índices históricos y compararlos con las campañas de monitoreo; en este punto se encontró que en Bogotá se llevan registros más rigurosos que en las otras cuencas, en tanto que en el cálculo de los índices de ICA y WQI se presentó una calidad aceptable para la parte alta de las cuencas y en las partes medias y bajas se hallaron calidades muy malas y pobres.

Para el Ical se encontró un valor alto, debido a la DBO₅ y DQO de los factores poblacional e industrial.

METODOLOGÍA

Selección de puntos de monitoreo

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

Cartográfico

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

De campo

Una vez identificados cartográficamente los posibles puntos de monitoreo de cada una de las cuencas, en terreno se tuvieron en cuenta la facilidad de acceso a los puntos identificados de monitoreo, características específicas de las masas de agua para la representatividad de la muestra y aguas abajo de zonas de mezcla dadas por vertimientos importantes.

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

Campañas de monitoreo

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

Más adelante se presenta la localización de los puntos de monitoreo de las cuencas de estudio (tabla 1 y figura 1).

Tabla 1
Puntos de monitoreo

Cuenca	Nombre	Norte	Este
Salitre	Quebrada La Vieja	1005857,161	1003422,011
	Quebrada Las Delicias	1004597,736	1002805,636
	Quebrada Arzobispo	1002939,001	1002435,829
	PTAR Salitre	1015920,202	994755,82
Fucha	El Delirio	995290,444	1002066,162
	Descarga del río Fucha	1007500,903	991605,408
	Quebrada San Francisco	1000472,415	1002284,872
Torca	San Simón	1023611,727	1004148,432
	Quebrada La Floresta	1023683,055	1005188,705
	Bosque de Pinos	1014062,501	1006252,571
	Calle 161 Dardanelos	1015874,077	1004466,268
	Descarga río Torca	1026185,811	1003723,073

Fuente: EAB-Consortio Hidrocuencas, 2016.

Toma de muestras

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

En cada uno de los puntos de monitoreo se tomaron las muestras de parámetros físicos, químicos y microbiológicos de DBO₅, DQO, SST, P_T, N_T, G y A, SAAM y CF, para llevarlos al laboratorio. *In situ*, se tomaron valores de T °C, CE, pH y OD.

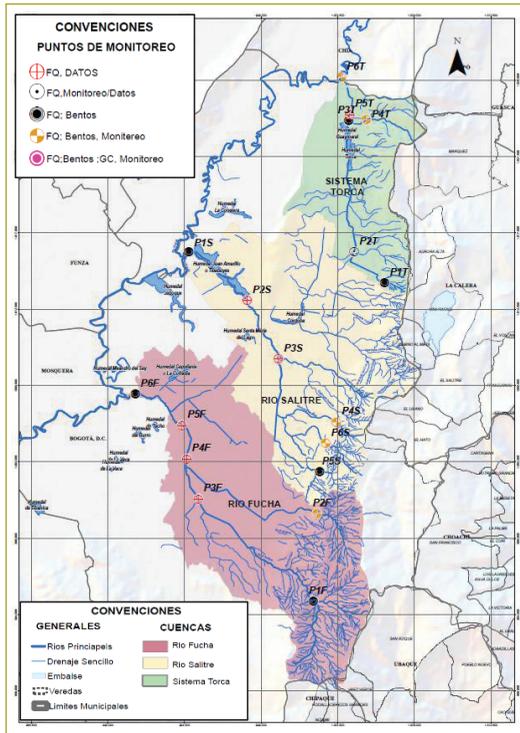


Figura 1. Localización de los puntos de monitoreo de las cuencas de los ríos Fucha, Salitre y Torca.

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

Índices de calidad del agua

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

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

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

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

Tabla 2
Matriz de calificación ICA

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

Fuente: ENA 2010 (Ideam, 2010).

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

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

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

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

Objetivos de calidad del agua. Se basaron en la Resolución 5731 de 2008, correspondientes a diez parámetros (OD, pH, DBO₅, DQO, N_T, P_T, CF, GyA, SST y SAAM) (tabla 3).

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

Tabla 3

Objetivos de calidad del agua para las cuencas Torca, Salitre y Fucha

Parámetro	Und	Tramos Torca		Tramos Salitre				Tramos Fucha			
		I	II	I	II	III	IV	I	II	III	IV
OD	mg/L	5	2	8	5	2	2	8	5	0,5	0,5
DBO ₅	mg/L	5	100	5	60	100	100	5	40	60	60
DQO	mg/L	30	250	30	90	250	250	30	90	180	160
N total	mg/L	2	20	2	10	20	20	1,5	10	10	10
P total	mg/L	0,2	1	0,2	1	1	1	0,1	1	1	1
SST	mg/L	10	60	10	30	60	60	10	25	30	30
A y G	mg/L	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Coliformes fecales	NMP/1000 mL	1,E+04	1,E+05	1,00 E+04	1,00 E+05	1,00E+05	1,00 E+05	1,00 E+02	1,00 E+05	1,00 E+05	1,00 E+05
pH	Unidad	6,5	6,5-8,5	6,5	6,5 - 8,5	6,5	6,5	6,5-8,5	6,5	6,5- 8,5	6,5- 8,5
SAAM	mg/L	0,5	1	0,5	1	1	1	0,5	1	1	1

Fuente: Resolución 5731 de 2008.

Tabla 4

Matriz de calificación del WQI

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

Fuente: (SDA , 2008).

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

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

tes. A continuación se muestran las calificaciones que se pueden obtener después de calcular el Iacal (tabla 5).

Tabla 5

Índice de calificación del Iacal

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

Fuente: Ideam (s.f.).

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

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

Donde:

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

Tabla 6
Resultados ICA en la cuenca Torca, año 2015

Cuenca		Torca	Resumen ICA, año 2015			
N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	WQI numérico	WQI cualitativo
1	Bosque de Pinos	I	2015	I	0,80	Aceptable
2	Cl. 161 Dardanelos	I	2015	I	0,41	Mala
3	San Simón	II	2015	I	0,38	Mala
4	Entrada Club Guaymaral	II	2010	II	0,41	Mala

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuencas.

K_z : carga contaminante proveniente de otras actividades económicas en t/año.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la cuenca Torca

ICA. Los resultados de los datos del ICA corresponden al periodo 2010-2015, en el que el comportamiento histórico es casi similar para toda la cuenca en todos los periodos. En la tabla anterior se resumen los valores del ICA de todos los puntos en el periodo más reciente disponible (tabla 6).

Es posible observar que en el único punto de la cuenca donde se tiene una calidad del agua aceptable es en **Bosque de Pinos**, debido a que en este punto la comunidad respeta y conserva las condiciones naturales de la corriente de agua. En los demás puntos, donde el cauce ha sido canalizado y ha recibido vertimientos de la ciudad, se obtiene una mala calificación de la calidad del agua.

El ICA calculado para las tres campañas de monitoreo registra un comportamiento muy parecido al histórico. Los puntos monitoreados de la parte alta de la cuenca (Bosque de Pinos y quebrada La Floresta) presentan una calidad aceptable, mientras que en los de las partes media y baja la calidad oscila entre regular y mala (tabla 7).

WQI. Los resultados históricos de los datos del WQI corresponden al periodo 2010-2015, en el que el comportamiento histórico es casi similar para toda la cuenca en todos los periodos. A continuación, se resumen los valores del WQI de todos los puntos en el periodo más reciente disponible (tabla 8).

Como se puede apreciar, el índice WQI presentó resultados similares al ICA.

El WQI calculado para las tres campañas de monitoreo registra un comportamiento muy parecido. Los puntos monitoreados de la parte alta de la cuenca, comparados con el histórico, presentaron una variabilidad entre regular y marginal, y en las partes media y baja de la cuenca tuvieron una calidad pobre.

Tabla 7
Resultados ICA en la cuenca Torca, promedio campañas

Cuenca		Torca	Resumen ICA, promedio			
N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	ICA numérico	ICA cualitativo
1	Bosque de Pinos	I	2016	I	0,76	Aceptable
2	Quebrada La Floresta	I	2016	I	0,71	Aceptable
3	Calle 161 Dardanelos	II	2016	I	0,53	Regular
4	San Simón	II	2016	I	0,38	Mala
5	Desembocadura	II	2016	I	0,40	Mala

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuencas.

Tabla 8
Resultados WQI en la cuenca Torca, año 2015

Cuenca		Torca	Resumen WQI, año 2015			
N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	WQI numérico	WQI cualitativo
1	Bosque de Pinos	I	2015	I	71,69	Regular
2	Calle 161 Dardanelos	I	2015	I	5,47	Pobre
4	San Simón	II	2015	I	12,84	Pobre
5	Entrada Club Guaymaral	II	2010	I	20,67	Pobre

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

Iacal. Para el cálculo del indicador se utilizó información secundaria de acuerdo con los sectores hidráulicos de la cuenca, analizándolos desde las cargas poblacional e industrial, debido a que en esta zona no se reportaron cultivos de café, sacrificio de ganado ni otras actividades económicas (tabla 9).

En todos los sectores hidráulicos de la cuenca Torca el Iacal resulta calificado como muy alto, lo que significa que en toda esta zona la carga contaminante ejercida por la población y el sector industrial es muy grande, excepto en la zona alta de la cuenca.

Parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la cuenca Salitre

ICA. Los resultados históricos de los datos del ICA corresponden al periodo 2006-2015, en el que el comportamiento histórico es casi similar para toda la cuenca en todos los lapsos. Los valores del ICA de todos los puntos en el periodo más reciente se resumen más adelante (tabla 10).

Como se puede observar, en el único punto de la cuenca donde se tiene una calidad del agua aceptable es en la **quebrada Arzobispo**, en la que se conservan

Tabla 9
Resumen de cargas contaminantes en la cuenca Torca

Cargas contaminantes		DBO t/ año	DQO t/ año	DQO- DBO t/ año	SST t/ año	N _T t/ año	P _T t/ año	Total t/ año
K _p	Fracción conectada al alcantarillado que vierte directamente al sistema Torca	4237,05	9533,35	5296,31	6355,57	706,17	282,47	16.877,56
	Fracción conectada al alcantarillado que vierte a la cuenca Salitre	442,48	2395,29	1952,81	505,31	260,37	104,15	3265,12
	Fracción conectada a pozo séptico	12,24	24,48	12,24	7,33	-	-	31,81
K _{IND}	Fracción conectada al alcantarillado que vierte directamente al sistema Torca	588,54	810,67	222,12	411,63	-	-	1222,30
	Fracción conectada al alcantarillado que vierte a la cuenca Salitre	148,06	220,92	72,85	61,19	-	-	282,10
K		5428,37	12.984,71	7556,34	7341,02	966,55	386,62	21.678,90

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

Tabla 10
Resultados ICA en la cuenca Salitre, año 2015

Cuenca		Salitre	Resumen WQI, año 2015			
N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	WQI numérico	WQI cualitativo
1	Quebrada Arzobispo	I	2015	I	0,75	Aceptable
2	Av. 68 con Cl. 80	III	2015	I	0,32	Mala
3	Humedal Cl. 98 Cra. 94G	IV	2015	I	0,32	Mala
4	PTAR Salitre	IV	2015	I	0,36	Mala

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

Tabla 11
Resultados ICA en la cuenca Salitre, promedio campañas

Cuenca		Salitre	Resumen ICA, promedio			
N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	ICA numérico	ICA cualitativo
1	Quebrada La Vieja	I	2016	I	0,76	Aceptable
2	Quebrada Las Delicias	I	2016	I	0,69	Regular
3	Quebrada Arzobispo	I	2016	I	0,74	Aceptable
4	PTAR Salitre	IV	2016	I	0,35	Mala

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

Tabla 12
Resultados WQI en la cuenca Salitre, año 2015

N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	WQI numérico	WQI cualitativo
1	Quebrada Arzobispo	I	2015	I	67,42	Regular
2	Av. 68 con Cl. 80	III	2015	I	4,19	Pobre
3	Humedal Cl. 98 Cra. 94G	IV	2015	I	8,55	Pobre
4	PTAR Salitre	IV	2015	I	3,55	Pobre

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

las condiciones naturales de la corriente de agua. En los demás puntos, donde el cauce se ha canalizado y ha recibido vertimientos de la ciudad, se obtiene una mala calificación de la calidad del agua.

El ICA calculado para las tres campañas de monitoreo se realizó en puntos altos de la cuenca y la parte baja, mientras que en la parte media sólo se trabajó con datos históricos, como se presentó anteriormente. En la tabla siguiente se observa que aún se conserva la calidad del agua de las quebradas altas de la cuenca del Salitre, exceptuando la de Las Delicias, que presentó flujo únicamente en época de invierno con una calidad regular y el punto de la PTAR Salitre, correspondiente a la descarga de la cuenca, ésta sí de mala calidad (tabla 11).

WQI. Los resultados históricos de los datos del WQI corresponden al periodo 2006-2015, donde el comportamiento histórico es casi similar para toda la cuenca en todos los periodos (tabla 12).

Como se puede observar, el índice WQI presentó un resultado similar al ICA.

El WQI calculado para las tres campañas de monitoreo presenta un comportamiento muy parecido, donde los puntos monitoreados de la parte alta, comparados con el histórico, presentaron una variabilidad entre

regular y marginal, así como una calidad pobre en la parte baja de la cuenca.

Cabe destacar que en la quebrada Las Delicias sólo se utilizaron datos de las campañas 2 y 3 para el cálculo del WQI, debido a que durante la primera campaña no había caudal en dicha corriente. En este caso, los sólidos suspendidos totales, la demanda biológica de oxígeno, el nitrógeno total y el pH no cumplieron con las disposiciones establecidas por la SDA.

Iacal. Para calcular el indicador se usó información secundaria de acuerdo con los sectores hidráulicos de la cuenca, analizándolos desde la carga poblacional e industrial, debido a que en esta zona no se reportaron cultivos de café, sacrificio de ganado y otras actividades económicas (tabla 13).

A continuación se presentan los resultados del Iacal para los sectores hidráulicos de la cuenca del Salitre (figura 2).

Tabla 13
Resumen de cargas contaminantes, cuenca Salitre

Cargas contaminantes	DBO t/año	DQO t/año	DQO-DBO t/año	SST t/año	N _T t/año	P _T t/año	Total t/año
K _p	14.752,3	33.192,6	18.440,3	22.128,4	2458,7	983,5	58.763,2
K _{IND}	5493,4	7952,9	2459,5	4817,0	-	-	12.769,8
K	20.245,6	41.145,4	20.899,8	26.945,3	2458,7	983,5	71.533,0
Remoción PTAR Salitre	11.888,5	-	-	19.514,6	-	-	-
% de carga contaminante restante	41,28 %	100,00 %	100,00 %	27,58 %	100,00 %	100,00 %	56,10 %
K final	8357,2	41.145,4	20.899,8	7430,7	2458,7	983,5	40.129,9

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

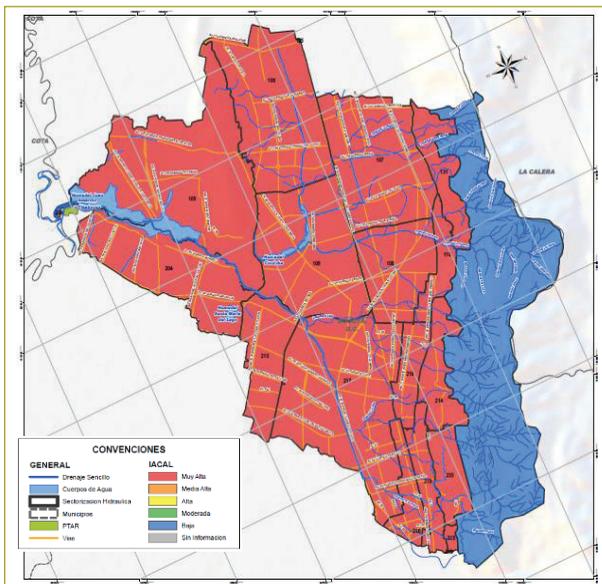


Figura 2. Sectores hidráulicos en la cuenca del Salitre.

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

Como se puede observar, todos los sectores hidráulicos se ilustran en rojo, correspondiente a un Ical muy alto, y la parte alta, que no está dentro de ningún sector hidráulico y no tiene población ni industrias que contaminen potencialmente el agua, se ilustra en azul, que corresponde a un Ical bajo.

Parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la cuenca Fucha

ICA. Los resultados históricos de los datos del ICA corresponden al periodo 2006-2015, en el que el comportamiento histórico es casi similar para toda la cuenca en todos los periodos (tabla 14).

El Delirio es el único punto de la cuenca donde se tiene una calidad del agua aceptable, debido a que allí se conservan las condiciones naturales de la corriente de agua. En los demás puntos, donde el cauce se ha canalizado y se han recibido vertimientos de la ciudad, se obtiene una mala calificación de la calidad del agua.

El ICA calculado para las tres campañas de monitoreo presenta un comportamiento muy parecido al histórico, donde los puntos monitoreados de la parte alta (El Delirio y quebrada San Francisco) tienen una calidad aceptable y en la parte baja registran una calidad mala. No se monitoreó la parte media, debido a que la SDA cuenta con registros históricos.

WQI. Los resultados históricos de los datos del WQI corresponden al periodo 2006-2015, en el que el comportamiento histórico es casi similar para toda la cuenca en todos los periodos (tabla 15).

Tabla 14
Resultados ICA en la cuenca Fucha, año 2015

N.º	Cuenca	Fucha	Resumen ICA, periodo más reciente			
			Punto	Sector	Año	Semestre
1	El Delirio	I	2015	I	0,80	Aceptable
2	Av. Ferrocarril	III	2015	I	0,33	Mala
3	Av. Américas	III	2015	I	0,32	Mala
4	Av. Boyacá	IV	2015	I	0,32	Mala
5	Desembocadura	IV	2015	I	0,26	Mala

Fuente: EAB-Consorcio Hidrocuenas.

Tabla 15
Resultados WQI en la cuenca Fucha, año 2015

Cuenca		Fucha	Resumen WQI, año 2015			
N.º	Punto	Sector	Año	Semestre	WQI numérico	WQI cualitativo
1	El Delirio	I	2015	I	63,47	Marginal
2	Av. Ferrocarril	III	2015	I	6,73	Pobre
3	Av. Américas	III	2015	I	6,90	Pobre
4	Av. Boyacá	IV	2015	I	5,43	Pobre
5	Desembocadura	IV	2015	I	7,93	Pobre

Fuente: EAB-Consortio Hidrocuenas.

Como se puede observar, los resultados del índice de WQI son similares a los del ICA.

El WQI calculado para las tres campañas de monitoreo presenta un comportamiento muy parecido, donde los puntos monitoreados de la parte alta comparados con el histórico registraron una calidad marginal y en la parte baja de la cuenca tuvieron una calidad pobre.

En los puntos El Delirio y quebrada San Francisco no se obtuvo una calificación más alta debido a que los sólidos suspendidos totales, el nitrógeno total, el fósforo total y los coliformes fecales no cumplieron, por lo menos en una campaña, con los objetivos de calidad establecidos por la SDA, a pesar de tener concentraciones mucho mejores que en el punto de monitoreo de la cuenca baja.

Ical. Para calcular el indicador se utilizó información secundaria, de acuerdo con los sectores hidráulicos de la cuenca, analizándolos desde la carga poblacional, industrial y de sacrificio de ganado, debido a que en esta zona no se reportaron cultivos de café y otras actividades económicas (tabla 16).

A renglón seguido, se presentan los resultados del Ical para los sectores hidráulicos de la cuenca del río Fucha (figura 3).

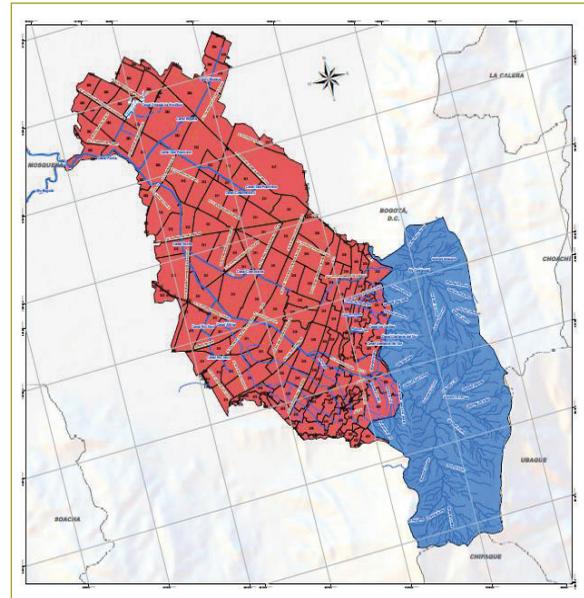


Figura 3. Sectores hidráulicos en la cuenca del río Fucha.

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

Tabla 16
Resumen de cargas contaminantes en la cuenca del río Fucha

Cargas contaminantes	DBO t/año	DQO t/año	DQO-DBO t/año	SST t/año	N _T t/año	P _T t/año	Total t/año
K _p	29.382,46	66.110,53	36.728,07	44.073,69	4897,08	1958,83	117.040,13
K _{IND}	23.102,36	32.819,77	9717,41	11.806,94	0,00	0,00	44.626,71
K _{SG}	5,4	10,56	5,16	2,4	-	-	23,52
K _C	-	-	-	-	-	-	-
K _Z	-	-	-	-	-	-	-
K	52.490,22	98.940,86	46.450,64	55.883,03	4897,08	1958,83	161.690,36

Fuente: EAB-Consortio Hidrocuenas.

Como se puede observar, todos los sectores hidráulicos ilustrados en rojo corresponden a un Iacal muy alto, y la parte alta, que no está dentro de ningún sector hidráulico y no tiene población ni industrias que contaminen potencialmente el agua, está ilustrada en azul, correspondiente a un Iacal bajo. Debido a que en este sector de los cerros orientales no se reportan industria ni población, en este caso el Iacal obtiene el mejor puntaje posible.

CONCLUSIONES

- **Cuenca Torca.** Los resultados obtenidos del ICA y WQI concuerdan con la realidad de la cuenca. En la parte alta de la cuenca la calidad del agua es aceptable porque no se presentan tantos vertimientos, mientras que en sus partes media y baja su calidad se deteriora debido a que actualmente no se realiza ningún tratamiento previo de las aguas residuales antes de ser vertidas al río Torca.
- **Cuenca Salitre.** Los resultados obtenidos del ICA y WQI sólo mantienen condiciones aceptables en la cuenca alta debido a que en ese punto no se recibe ningún tipo de vertimiento. Por otro lado, en virtud de que en Bogotá no se realiza un tratamiento previo de las aguas residuales antes de ser vertidas sobre el agua del Salitre, apenas la corriente comienza a recibir vertimientos, se contamina. Este es el factor determinante para que la calidad del agua en los demás puntos sea calificada como mala.
- **Cuenca Fucha.** Los resultados obtenidos del ICA y WQI únicamente mantienen condiciones aceptables en la cuenca alta debido a que en ese punto no se recibe ningún tipo de vertimiento. Cuando el río entra en contacto con la ciudad comienza a recibir muchos vertimientos y conexiones erradas que han deteriorado la calidad de la fuente.
- El agua de las cuencas urbanas, como Torca, Salitre y Fucha, presenta un Iacal alto a causa del elevado valor de DBO₅ y DQO debido a los factores poblacional e industrial.

Agradecimientos

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

REFERENCIAS

- EAB-ESP-Consorcio Hidrocuenas (2016). Producto 4. *Cálculo de los indicadores para la oferta, la demanda, la calidad y los riesgos asociados al recurso de las corrientes objeto de los estudios desarrollados 100 % de avance. Informe final.* Contrato de consultoría N.º 1-02-24300-754-2015, cuyo objeto principal es "Elaborar los estudios de balance hídrico en cuencas que pertenecen a la región hídrica, mediante la implementación de los indicadores de la evaluación regional del agua (ERA), para diferentes escenarios hidrológicos, que permitan conocer el estado de las mismas, como estrategia de gestión integral del sistema hídrico frente a la variabilidad y el cambio climático".
- EAB-ESP -EPAM S.A. (2013). *ERA Fase I. Realizar una propuesta de estrategias, metodologías y herramientas para la implementación de la evaluación regional del agua, así como para definir los requerimientos funcionales del sistema de información regional del recurso hídrico.* Bogotá, D.C.
- EAB-ESP-EPAM S.A. (2014). Producto 3. *Desarrollo y validación de la evaluación regional del agua en la cuenca hidrográfica del río Tunjuelo.* Bogotá, D.C.
- Ideam (2010). *Estudio Nacional del Agua (ENA) 2010.* Bogotá.
- Ideam (2011). Índice de calidad del agua en corrientes superficiales. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/documents/24155/123679/08-3.21_HM_Indice_calidad_agua_3_FI.pdf/c0c6eca3-1a2b-484c-82f8-76536f62e2c7.
- Ideam (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua.* Bogotá, D.C.
- Ideam (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014.* Bogotá, D.C.
- MADS (2007). Decreto 1323 de 2007, "Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH)". Bogotá, D.C.
- MADS (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.* Colombia.
- MADS (2011). *Ruta metodológica para la definición de los actores claves en la planeación de las áreas del sistema de Parques Nacionales Naturales.* Bogotá, D.C.
- SDA (2008). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá, D.C., 2008-2009.*
- SDA (2009). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá, D.C., 2009-2010.*
- SDA (2010). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá, D.C., 2010-2011.*
- SDA (2011). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá, D.C., 2011-2012.*
- SDA (2012). *Calidad del recurso hídrico de Bogotá, D.C., 2012-2013.*

Modelamiento de módulos fotovoltaicos con programas de análisis de sistemas de potencia en la red de distribución

Modelling of photovoltaic modules with power system analysis software in the distribution network

JAVIER ANDRÉS RUIZ GARZÓN¹ - DANIEL JOSÉ GONZÁLEZ TRISTANCHO¹ - PAOLA ANDREA MORA MORA²

1. Profesores del programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Estudiante del programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

javier.ruiz@escuelaing.edu.co - daniel.gonzalez@escuelaing.edu.co -
paola.mora-m@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 14/02/2017 Aceptado: 18/03/2017

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

Resumen

En el panorama energético actual se contempla la inclusión de fuentes no convencionales de energías renovables (FNCR) en las redes eléctricas, como estrategia de gestión para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, impulsar el desarrollo económico sostenible, dar robustez al sistema eléctrico y aumentar la eficiencia energética, dando como resultado un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos disponibles.

La implementación de estas fuentes alternativas modifica el flujo de energía tradicional en la red, donde el usuario sólo desempeña el rol de consumidor, convirtiéndolo en un agente activo que puede inyectar potencia a la red. Esto conlleva al estudio de problemas como la irregularidad y el almacenamiento de la energía producida, y crea la necesidad de realizar un modelamiento previo, basado en las características propias del recurso energético y su respectiva integración en la red de distribución local, por medio de herramientas de simulación que faciliten la evaluación del impacto y el comportamiento del sistema en diferentes escenarios, teniendo en cuenta la disponibilidad e intermitencia del recurso y la variación de la demanda.

En este artículo se describen las características de un sistema fotovoltaico (PV) conectado a la red de distribución y se determinan los principales parámetros que hay que considerar para su diseño. A partir de esto se hace un análisis comparativo de tres programas de simulación para modelamientos de sistemas de potencia: ETAP, NEPLAN y OpenDSS, identificando en qué parámetros de entrada se basa cada

uno, para realizar simulaciones y su adaptación a la realidad, donde la intermitencia del recurso primario es un factor importante.

Palabras claves: fuentes no convencionales de energía renovable, sistema fotovoltaico, red de distribución, programas de simulación, intermitencia del recurso, radiación solar.

Abstract

The current energy outlook considers the inclusion of non-conventional renewable energy sources (NCRS) into electricity networks, as a management strategy to reduce greenhouse gas emissions, promote sustainable economic development, strengthen the electrical system, and increase efficiency, resulting in a better use of available energy resources.

The implementation of these alternative sources modifies the traditional flow of energy in the network, where the user only played the role of consumer, turning it into an active agent that can inject power back to the network. This leads to the study of problems such as irregularity and storage to perform a preliminary modeling based on the characteristics of the energy resource and its respective integration in the local distribution network, through simulation tools that facilitate the assessment of the impact and behavior of the system in different scenarios considering the availability and intermittence of the resource and the variation of the demand.

This article describes the characteristics of a photovoltaic (PV) system connected to the distribution network and determines the main param-

ters to be considered in its design. A comparative analysis is performed using three simulation software packages for power systems modeling: ETAP, Neplan, and OpenDSS, identifying which input parameters are required to perform simulations and its adaptation to reality where the intermittence of the primary resource is an important factor.

Keywords: non-conventional renewable energy sources, photovoltaic system, distribution network, simulation software, resource intermittence, solar radiation.

INTRODUCCIÓN

En el ámbito internacional, países líderes en integración de recursos renovables a la red de distribución han impulsado la aplicación de estos recursos mediante incentivos e instrumentos tales como tarifas o primas reguladas (*Feed-in-Tariffs*, FITs) (Boyle, 2012), certificados de energía renovable (RECs), cuotas, subastas y medición bidireccional, los cuales han demostrado ser herramientas para promover la aplicación de tecnologías renovables y se pueden tomar como referencia para el desarrollo incipiente en Colombia.

En el país, la Ley 1715 de 2014 regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional, al establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción y aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente las de carácter renovable, fomentando la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía (Colombia, 2014), tomando en cuenta que ha tenido avances tales como la resolución de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) 045 del 3 de febrero de 2016, en la cual se establecen el procedimiento y los requisitos para acceder a los beneficios tributarios que se enuncian en los artículos 12 y 13 de la citada Ley 1715 (UPME, 2016), y la Resolución 143 para registro de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de las FNCER (UPME, 2016), aún están pendientes:

- Generación distribuida y entrega de excedentes a la red eléctrica.
- Requerimientos técnicos para instalaciones con FNCER → MinMinas.
- Parámetros ambientales de proyectos con FNCER → MinAmbiente.
- Fomento de actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación.
- Formación y capacitación de capital humano.

Sin embargo, cabe destacar que Colombia, debido a su posición geográfica en la zona ecuatorial, posee un gran potencial para la explotación de energías alternativas como la solar, ya que cuenta con radiación con tendencia constante por períodos promedio de doce horas al día en determinadas zonas del territorio nacional, con una radiación media de 4,5 [kWh/m²] (*La República*, 2012). Lo anterior, junto con la disminución en los precios de los paneles solares por su creciente demanda a escala internacional, ha hecho atractiva la utilización de este tipo de energía.

Uno de los requisitos fundamentales para el diseño y dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos consiste en un registro o tabla de radiaciones del sector donde se planea instalar uno de estos sistemas. Para esto se pueden utilizar valores registrados por estaciones meteorológicas, las cuales cuentan con un instrumento de medición de radiación solar incidente, denominado piranómetro, que se encarga de medir en tiempo real dicha radiación. Estos registros de datos pueden utilizarse promediados para la zona geográfica de interés y es posible acceder a ellos a través de la herramienta interactiva del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), llamada Atlas de radiación solar de Colombia (Ideam, 2015).

Teniendo en cuenta la variabilidad de la irradiación en diferentes periodos y la curva de demanda característica de la red a la cual se va a implementar el sistema fotovoltaico, surge la necesidad de encontrar herramientas computacionales con el fin de modelar sistemas fotovoltaicos conectados a la red cada vez más precisos, que consideren dicha variación dentro de su simulación, para la realización de flujos de potencia y análisis dinámicos del sistema, evaluando su comportamiento ante distintos escenarios.

DESCRIPCIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A LA RED.

La luz solar es un recurso inagotable y gratuito, a pesar de su intermitencia en términos de disponibilidad en el tiempo; en periodos de irradiación importante, permite generar energía directamente en el lugar de consumo, contribuyendo a la mejora de la calidad del servicio eléctrico, reforzando la respuesta a la demanda.

Un sistema conectado a la red de suministro eléctrico, además, es una forma de generación distribuida que

disminuye la dependencia energética de otras fuentes no renovables y reduce la necesidad de invertir en nuevas líneas de transmisión que amplíen la red existente e involucren grandes obras civiles, ocupación de terrenos extensos y costos de inversión muy superiores a los que se requieren para implementar un sistema de generación fotovoltaico local.

Los sistemas de generación de energía fotovoltaica, a diferencia de los tipos de generación con recurso eólico y fuentes no renovables, se destacan por ser escalables, modulares, fáciles de instalar, tener bajo nivel de contaminación ambiental y acústico, escasa alteración de los ecosistemas, reducido impacto visual, requerir mínimo mantenimiento y no tener ningún tipo de desgastes mecánicos por rozamiento, vibraciones ni esfuerzos.

La radiación solar se define como la energía procedente del Sol en forma de ondas electromagnéticas, en tanto que a la potencia solar incidente en una superficie se le denomina irradiancia, la cual se mide en W/m^2 ; por último, la radiación corresponde a la potencia solar incidente en una superficie en un periodo de tiempo, cuya unidad es Wh/m^2 (NREL, 2010).

La producción de energía con recurso solar es directamente proporcional a la radiación incidente en los paneles fotovoltaicos y depende de la zona geográfica donde se ubiquen, la estación del año, nubosidad, entre otros factores climáticos y ambientales, además de las características técnicas y constructivas de los paneles.

Un esquema típico de generación fotovoltaica para interconexión a red se evidencia en la figura siguiente (figura 1), cuyos principales componentes se describen a continuación (IDAE, 2011):

- *Paneles o módulos solares fotovoltaicos.* Arreglos de células fotovoltaicas conectadas entre sí que generan electricidad en forma continua (DC) directamente, a partir de la radiación incidente sobre su superficie.
- *Inversores fotovoltaicos.* Dispositivos electrónicos que convierten la energía eléctrica DC procedente de la conversión fotovoltaica en energía eléctrica AC para suministrarla al sistema; además, muchos incluyen la función de seguimiento de punto de máxima potencia del sistema fotovoltaico para conseguir el máximo rendimiento de la instalación.
- *Contadores de energía generada.* Medidores de la energía suministrada por la instalación fotovoltaica.

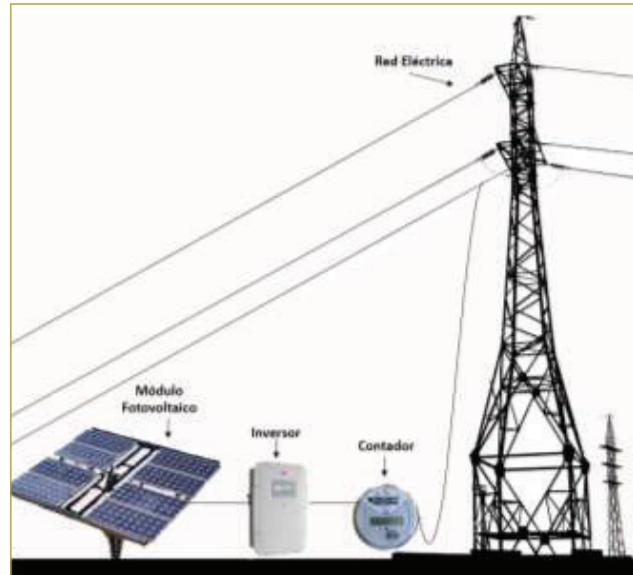


Figura 1. Sistema fotovoltaico conectado a la red. Fuente: Elaboración propia.

DATOS TÉCNICOS DE UN MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO

Las células solares fotovoltaicas, asociadas en módulos fotovoltaicos, se han desarrollado con diferentes tecnologías, las cuales aportan características adicionales a nivel técnico y económico. Los tipos más comunes de módulos fotovoltaicos son (Carta, Calero, Colmenar, Castro & Collado, 2013):

- *Monocristalinos.* Se caracterizan por ser los más eficientes, ya que registran eficiencias en rangos del 15 al 21 %. Sin embargo, su proceso de fabricación requiere alta pureza y gran cantidad de silicio, lo que incurre en un elevado gasto energético. Su apariencia consiste en un mismo color uniforme a lo largo de la superficie del panel.
- *Policristalinos.* Son los más comunes. Su costo de fabricación es inferior a los monocristalinos y su eficiencia es del orden del 16 %.
- *Amorfos.* Los más económicos, pero de alta degradación respecto a la potencia generada. Su eficiencia está entre el 6 y 10 %.

Parámetros técnicos propios de un módulo fotovoltaico (Carta, Calero, Colmenar, Castro & Collado, 2013):

- *Corriente de corto circuito (I_{sc}).* Describe la corriente máxima producida por el panel en condiciones de

radiación y temperatura específicas, sin caída de tensión; por tanto, en dicho punto la potencia es nula.

- *Tensión de circuito abierto (V_{oc})*. Tensión máxima [V] del módulo, dadas unas condiciones de temperatura y radiación, sin flujo de corriente.
- *Corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp})*. Corriente correspondiente a la máxima potencia que puede suministrar el panel en condiciones dadas de radiación y temperatura, utilizada como la corriente nominal del dispositivo. Este parámetro se ubica en el punto de inflexión de la curva característica I-V del panel.
- *Tensión en el punto de máxima potencia (V_{mp})*. Tensión correspondiente a la máxima potencia que puede suministrar el panel en condiciones dadas de radiación y temperatura, utilizado como el voltaje nominal del módulo y que determina cuántas células o módulos son necesarios para una instalación específica; al igual que I_{mp} , este parámetro define el punto de inflexión de la curva I-V del panel.
- *Punto de máxima potencia (P_{mp})*. Máxima potencia de suministro del panel a determinadas condiciones de temperatura y radiación. Es el producto entre I_{mp} y V_{mp} , y en la curva I-V es el punto de inflexión.
- *Factor de forma (FF)*. Relación entre P_{mp} y el producto de I_{sc} y V_{oc} . Determina cómo es la transición en la curva I-V del módulo entre la zona de corriente y tensión constante; varía normalmente entre 0,7 y 0,8.
- *Eficiencia*. Relación entre la energía generada por el módulo y la energía solar incidente sobre su superficie.
- α . Coeficiente de temperatura de I_{sc} , que determina cómo cambia I_{sc} ante variaciones de temperatura. Se sitúa normalmente en el rango de 0,02 a 0,1 %/°C.
- β . Coeficiente de temperatura de V_{oc} , que determina cómo varía V_{oc} ante variaciones de temperatura. Se sitúa en el rango de -0,3 a -0,5 %/°C.
- γ . Coeficiente de temperatura de P_{mp} , que determina cómo cambia el P_{mp} del panel ante variaciones de temperatura. Se sitúa en el rango de -0,3 a -0,5 %/°C.
- *NOCT (Nominal Operating Cell Temperature)*. Temperatura nominal de operación de la celda, que generalmente corresponde a 45 °C.

El efecto de la temperatura de trabajo de los módulos y la radiación incidente son los factores que más afectan su rendimiento. Dicho efecto se puede evidenciar más adelante (figuras 2 y 3), donde a mayor temperatura, menor tensión y potencia; por otro lado, a mayor irradiación, mayor corriente y potencia.

Además, se puede realizar otra curva característica del panel, la curva P-T (figura 4), la cual se obtiene con el coeficiente de temperatura de P_{mp} , que muestra la relación entre potencia en el panel y su temperatura de trabajo. A mayor temperatura, menos potencia suministrada; dicha relación se ajusta a una regresión lineal con una covarianza de 0,98.

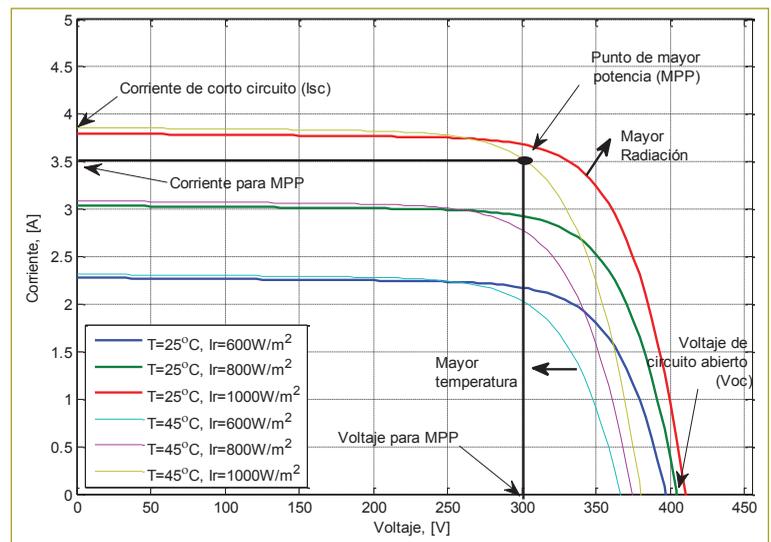


Figura 2. Curva corriente vs tensión (I-V) en diferentes condiciones de temperatura e irradiación. Fuente: González (2016).

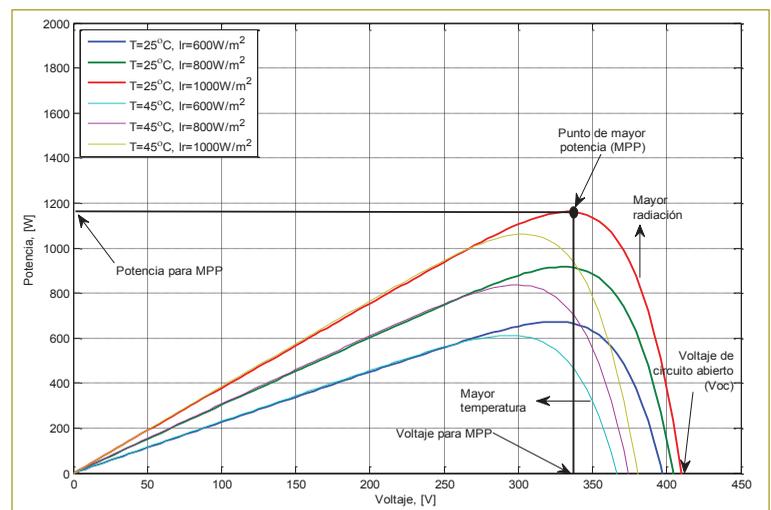


Figura 3. Curva potencia vs tensión (P-V) en diferentes condiciones de temperatura e irradiación. Fuente: González (2016).

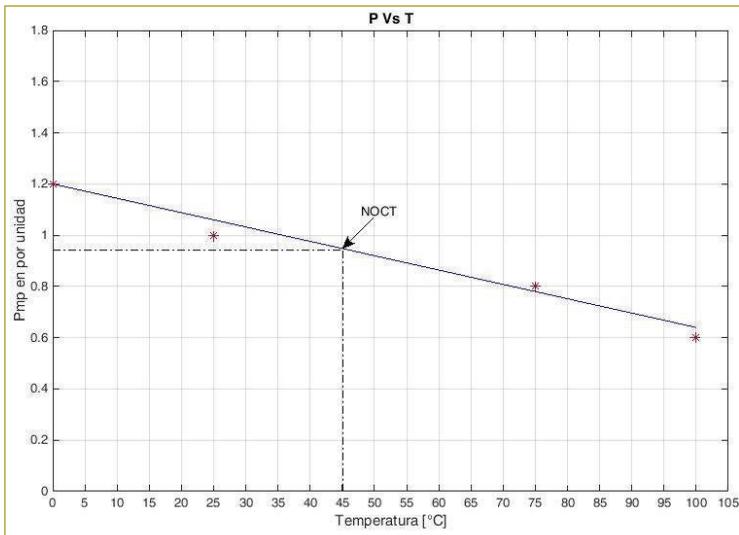


Figura 4. Curva potencia vs. temperatura (P-T) para diferentes valores de Pmp en por unidad (p.u.). Fuente: Elaboración propia.

MODELO DE INTEGRACIÓN EN SISTEMAS DE POTENCIA DE RECURSO INTERMITENTE SOLAR CON UN PROGRAMA ESPECIALIZADO

Los programas de simulación de transitorios electromagnéticos (*Electromagnetic Transients Programs*, EMTP's) son programas computacionales destinados al análisis de circuitos en régimen transitorio. Realizan una abstracción de la realidad al modelar matemáticamente sistemas eléctricos, mecánicos y de control, con fines de diseño, supervisión y análisis de riesgos.

Dos de las herramientas computacionales destacadas en el sector para simulaciones de sistemas de potencia son ETAP y NEPLAN. Por otro lado, el *software* OpenDSS es una herramienta de libre acceso que también permite modelar y analizar sistemas de potencia, con inclusión de recursos renovables.

1. ETAP

“Herramienta de análisis y control para el diseño, simulación, automatización de generación y operación de sistemas de potencia eléctricos de distribución e industriales” (ETAP, 2012).

Cuenta con diferentes módulos que permiten realizar flujos de carga, análisis de cortocircuito, de arcos eléctricos, coordinación de protecciones, calibración de relés, análisis de modelos dinámicos, estabilidad y transitorios, dimensionado de conductores, análisis de

calidad de la energía, sistemas de control, diseños de líneas de transmisión, sistemas de distribución, sistemas de puesta a tierra e integración de recursos renovables.

El módulo de energías renovables permite modelar sistemas eólicos y fotovoltaicos. Cuenta además con una extensa librería actualizada de generadores eólicos y paneles fotovoltaicos, con sus respectivos inversores de diferentes fabricantes y modelos.

Para el caso de paneles fotovoltaicos, permite el modelado ilimitado de paneles solares individuales o en grupos, conectándolos en serie o paralelo (ETAP, 2016).

Así mismo, ajusta los coeficientes de eficiencia y calcula su respectivo flujo de carga y otros análisis con un dato de irradiación base definido por la ubicación seleccionada y la hora, lo que permite simular varios escenarios en los que varíe la irradiación solar y su efecto sobre la generación.

Además, realiza el registro del máximo punto de potencia y las curvas P-V e I-V, las cuales se pueden definir mediante la librería o manualmente.

Al querer ingresar al sistema un panel fotovoltaico en este programa, se puede seleccionar un prototipo de la librería o ingresar los siguientes datos (figura 5):

Tensión y temperatura de operación, número de celdas, potencia nominal, V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} , I_{sc} , eficiencia, FF, irradiación, α , β y NOCT.

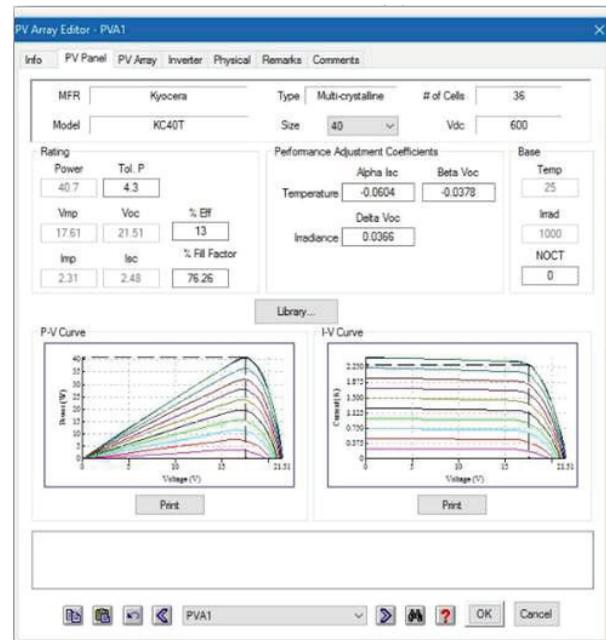


Figura 5. Datos de entrada PV Panel-ETAP. Fuente: Tomado directamente del programa ETAP.

2. NEPLAN

Herramienta informática para análisis, planeación, optimización y simulación de redes eléctricas, de agua, gas y vapor (GERS, 2014).

Su interfaz gráfica es didáctica y fácil de manejar. Cuenta con diferentes módulos para análisis y modelamiento, que cubren aspectos eléctricos en redes de transmisión, distribución, generación e industriales tales como flujo de carga, análisis de cortocircuito, análisis de selectividad, cálculo de parámetros para líneas de transmisión, flujo de carga óptimo, flujo de carga con perfiles de variación de carga, estabilidad, optimización en redes de distribución, análisis de fallas, análisis de armónicos, análisis de confiabilidad, de inversión y simuladores dinámicos.

Posee extensas librerías para sistemas de excitación, máquinas sincrónicas y asincrónicas, conductores, reguladores y transformadores.

Para la modelación de sistemas con fuentes renovables, cuenta con bloques de turbinas eólicas, paneles solares e inversores, con los cuales se pueden hacer los respectivos análisis de flujos de carga, simulaciones dinámicas y sus efectos sobre el sistema interconectado. En este programa para utilizar módulos fotovoltaicos e inversores con las características de los fabricantes se requiere introducir los datos por parte del usuario, además de que se hace necesario modelar tanto el panel o arreglo de paneles con sus respectivos inversores independientemente, no como se haría en ETAP, que ya incluye el arreglo de panel con inversor en conjunto como un solo elemento; sin embargo, dado que no hay librerías con dichos elementos, el usuario tiene la facilidad de crearlas y acceder a ellas cuando lo requiera.

En caso tal de no crear librerías, la implementación de un panel o arreglo de éste al sistema que se va a simular, requiere los siguientes datos de entrada (figura 6):

I_{sc} , V_{oc} , NOCT, temperatura, irradiancia, irradiancia base, delta de irradiancia para diferentes tiempos (para análisis dinámico), eficiencia, α , β , V_{mp} , I_{mp} , número de celdas en serie y en paralelo.

3. OpenDSS

Open Distribution System Simulator (OpenDSS) es una herramienta de simulación certificada por Electric Power Research Institute (EPRI) (EPRI, 2016).

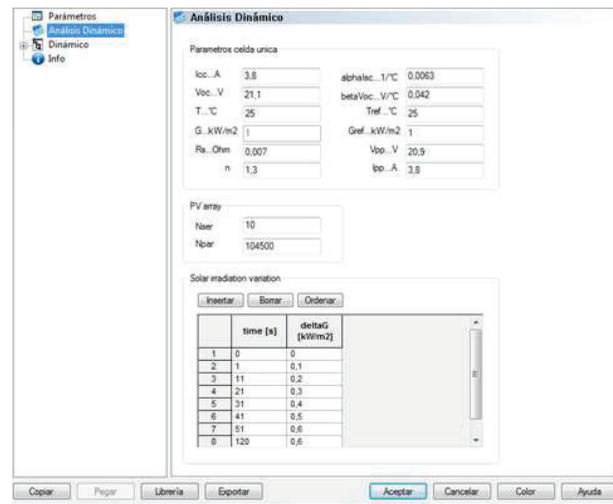


Figura 6. Datos de entrada PV Panel-Neplan. Fuente: Tomado directamente del programa NEPLAN.

Está diseñada para satisfacer las necesidades futuras relacionadas con redes inteligentes, la modernización del sistema interconectado y la investigación en el área de energías renovables.

Entre sus aplicaciones están los flujos de carga, análisis de armónicos, estudios de falla, variaciones paramétricas de carga. Transitorios electromecánicos y dinámicos, análisis de cargas desbalanceadas, análisis de riesgos en planificación de sistemas de distribución, estudios de planeación probabilísticos, desarrollo de perfiles de tensión, evaluación de control y automatización de la distribución, simulaciones y análisis de integración de generación distribuida a la red con recursos intermitentes, simulación de sistemas fotovoltaicos, simulación de plantas eólicas y modelado de almacenamiento.

El modelamiento de sistemas en esta herramienta se basa en lenguaje de programación C, lo cual permite manejar grandes cantidades de datos correspondientes a una sola variable en forma de vectores, realizando análisis como flujos de carga robustos para periodos definidos (diario, semanal, mensual, anual, etc.), considerando la variabilidad tanto del recurso como de la demanda.

Los datos de entrada necesarios para modelar sistemas fotovoltaicos en esta herramienta son:

- Irradiancia puntual o como un vector de datos, bien sea diario, anual, mensual, etc. P_{mpp} a 1 kW/m^2 y temperatura, NOCT, curva de eficiencia del inversor en función de la potencia y curva P vs. T , donde

P corresponde al valor en por unidad de P_{mp} a diferentes temperaturas.

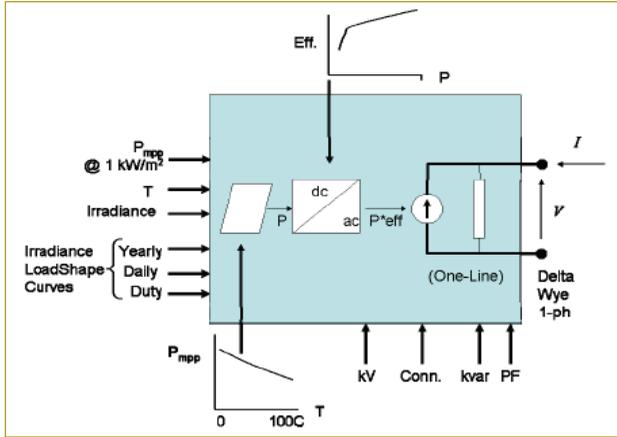


Figura 7. Diagrama de bloques de un sistema fotovoltaico conectado a la red con requerimientos en OpenDSS. Fuente: EPRI (2011).

4. Cuadro comparativo de características técnicas requeridas por las herramientas de simulación

Para llevar a cabo los análisis de generación de potencia eléctrica suministrada por los módulos fotovoltaicos, las herramientas de simulación requieren parámetros técnicos específicos (tabla 1). Algunos son comunes entre los programas, mientras que otros se encuentran a partir del tratamiento matemático de éstos.

En el caso de análisis de rendimiento e integración en la red de distribución, es necesario conocer los complementos que ofrece cada programa; por tanto, más adelante se explican algunas especificaciones de cada uno (tabla 2).

CONCLUSIONES

Para el modelamiento preciso de módulos fotovoltaicos se requieren herramientas de simulación que consideren tanto la disponibilidad e intermitencia del recurso de generación asociado como la variación de la demanda, es decir, herramientas que soliciten como parámetros de entrada perfiles de carga e intermitencia variables, de tal manera que se puedan ingresar al sistema como vectores de datos que varían en lapsos especificados.

Tabla 1
Parámetros técnicos requeridos para modelar paneles fotovoltaicos en diferentes programas

	ETAP	NEPLAN	OPENDSS
Isc	✓	✓	✗
Voc	✓	✓	✗
Imp	✓	✓	✗
Vmp	✓	✓	✗
Pmp	✗	✗	✓
FF	✓	✗	✗
Eficiencia	✓	✓	✓
α	✓	✓	✗
β	✓	✓	✗
γ	✗	✗	✓
NOCT	✓	✓	✓
# de celdas	✓	✓	✗
Curva I -V	✓	✗	✗
Curva P-V	✓	✗	✗
Curva P-T	✗	✗	✓
Curva de eficiencia del inversor en función de la potencia (P)	✗	✗	✓
Irradiancia puntual	✓	✓	✓
Irradiancia como vector de datos que varían con el tiempo	✗	✗	✓

Tabla 2
Propiedades de análisis de los diferentes programas

	ETAP	NEPLAN	OPENDSS
Análisis dinámico <i>off-line</i>	✗	✓*	✓
Librería con diferentes fabricantes y modelos incluida por defecto en el programa	✓	✗	✗
Flujos de carga con perfiles de variación de carga	✓**	✓	✓
Programa libre	✗	✗	✓

✓* Introducción manual de cambios en la irradiancia a partir de un valor de irradiancia base y un delta de variación.

✓** No directamente, sino acudiendo a *plugins* o aplicaciones externas.

A pesar de que algunos de los parámetros de entrada que requiere OpenDSS provienen de un tratamiento previo de las características técnicas de los módulos fotovoltaicos, se acude a menos parámetros, en los cuales se basa el *software* para identificar completamente el

arreglo fotovoltaico que se va a emplear y llevar a cabo los análisis correspondientes.

En el caso de la identificación de la curva P-T, tan sólo se necesitan NOCT, γ y Pmp del módulo para describir una función lineal aproximada con covarianzas superiores al 95 %, donde Pmp se toma como 1 en por unidad (p.u.) y (NOCT, 1) corresponde a una coordenada de la gráfica, cuya pendiente está definida por el parámetro γ .

Los perfiles de variación de carga y de variación de la irradiancia se pueden definir para diferentes periodos (diario, semanal, mensual, anual); para cada punto definido, OpenDSS realiza un respectivo flujo de carga y los análisis requeridos por el usuario, mostrando un compilado de resultados para cada uno de los puntos definidos.

OpenDSS no posee una interfaz gráfica tan amigable y fácil de manejar como la de ETAP o la de NEPLAN, debido a la introducción de parámetros mediante programación en lenguaje C; sin embargo, cuenta con enlaces a otros programas tales como Matlab, por lo que es posible importar tanto datos de entrada como resultados, hacerles tratamientos gráficos más avanzados y otros tipos de análisis.

Por las razones enunciadas anteriormente, OpenDSS se caracteriza por ser un simulador preciso, flexible y de fácil acceso al público entre los tres programas objeto de comparación en el presente artículo.

Herramientas como las descritas a lo largo del documento facilitan la integración de recursos renovables a la red de distribución al permitir una evaluación técnico-económica de los sistemas; esto, junto con los incentivos e instrumentos ofrecidos por los gobiernos para impulsar el uso de las FNCER, fomentan la inversión, investigación y desarrollo progresivos de tecnologías limpias para la producción de energía.

REFERENCIAS

- Boyle, G. (2012). *Renewable Energy*. Amersham, UK: Oxford University Press.
- Carta, J. A., Calero, R., Colmenar, A., Castro, M. A. & Collado, E. (2013). *Centrales de energías renovables*. Madrid: Pearson.
- Congreso de la República de Colombia (13 de mayo de 2014). Archivo de la Presidencia 2010-2014. http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/LEY_1715_DEL_13_DE_MAYO_DE_2014.pdf.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía) (2011). Instalaciones de energía solar fotovoltaica. Pliego de condiciones técnicas de instalaciones conectadas a red. Madrid, España.
- ETAP (2012). Detalles del producto. http://www.etapesp.es/assets/etap_overview.pdf.
- ETAP (2016). Energías renovables-energía solar. <http://etapesp.es/energiasolar.html>.
- GERS (2014). Boletín Universitario-I. <http://gers.com.co/wp-content/uploads/2014/02/BOLETIN-UNIVERSITARIO-I.pdf>.
- González, J. (2016). Prototipo de energía eléctrica fotovoltaica para el laboratorio de energía de la Escuela Colombiana de Ingeniería. <http://repositorio.escuelaing.edu.co/handle>.
- Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) (2015). Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
- EPRI (Electric Power Research Institute) (2011). OpenDSS PVSys-tem Element Model-Versión 1.
- EPRI (Electric Power Research Institute) (2016). OpenDSS Manual- Reference Guide.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory) (2010). Concentrating Solar Power- Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data. <http://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47465.pdf>.
- Minminas, UPME (Unidad de Planeación Minero Energética) (2016). *La República* (marzo de 2012). Colombia, un mercado con potencial en energía solar. http://www.larepublica.co/responsabilidad-social/colombia-un-mercado-con-potencial-en-energ%C3%ADa-solar_3773.
- UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), Minminas (3 de febrero de 2016). Resolución 045 del 3 de febrero de 2016. Colombia.
- UPME (Unidad de Planeación Minero Energética), Minminas. (2016). Resolución 143 de 2016. Colombia.

La robótica móvil, una herramienta para la innovación y el mejoramiento del sector agroindustrial

Mobile robotics, a tool for innovating and improving the agroindustrial sector

JAVIER ALBERTO CHAPARRO PRECIADO¹ - HÉCTOR FABIO CADAVID RENGIFO²

1. Decanatura de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Decanatura de Ingeniería de Sistemas de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

javier.chaparro@escuelaing.edu.co. - hector.cadaavid@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/02/2017 Aceptado: 21/03/2017

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

Resumen

La automatización de procesos se ha desarrollado principalmente en tareas repetitivas en el sector industrial, donde la incertidumbre tiene poca importancia. Actualmente, gracias a nuevas tecnologías que les proporcionan mayor inteligencia a los robots, la automatización se ha extendido a nuevos escenarios, como los hogares, las empresas, los seres humanos e, indudablemente, la producción agroindustrial. Mejorar la competitividad y las hectáreas cultivadas son algunas de las ventajas de incorporar tecnologías de automatización, como la robótica móvil o aérea tipo UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Los robots forman parte de las tecnologías utilizadas en la agricultura de precisión, apoyando actividades de siembra, cosecha, recolección, selección, almacenamiento, transporte y procesamiento de productos agrícolas, entre otras. Otra tecnología que tiene un enorme potencial en el tema agroindustrial es el procesamiento de imágenes multispectrales y la elaboración de índices de vegetación.

En este artículo se presentan los avances que se han hecho en el tema de robots e imágenes agroindustriales en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, teniendo en cuenta elementos de *hardware* y *software* que se pueden utilizar para el desarrollo de herramientas, equipos o servicios de apoyo a los pequeños cultivadores en el país.

Palabras claves: agricultura de precisión, robot móvil, *rovers*, UAV.

Abstract

Process automation has been developed mainly in the industrial sector in repetitive tasks where uncertainty holds a lesser importance. Nowadays, due to new technologies that give robots greater intelligence, automation has extended to new scenarios such as homes, companies, human beings, and undoubtedly agro-industrial production. Improving competitiveness and cultivated fields are some of the advantages of incorporating automation technologies such as Unmanned Aerial Vehicle (UAV) or mobile robotics. Robots are part of the technologies used in precision agriculture supporting activities of planting, harvesting, selection, storage, transport, and processing of agricultural products among others. Another technology that has a great potential in the agro-industrial field is the processing of multispectral images and the elaboration of vegetation indices.

This paper presents the advances that have been made in the field of robots and agro-industrial images at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito taking into account elements of hardware and software that can be used for the development of tools, equipment or support services to small farmers in our country.

Keywords: precision farming, mobile robot, rover, UAV.

INTRODUCCIÓN

La automatización de los procesos industriales se ha desarrollado desde hace varios años con el propósito de mejorar la productividad y la competitividad de las empresas mediante la aplicación de diferentes tecnologías para monitorear y controlar tareas repetitivas. Esta tendencia ha ganado terreno en otros escenarios fuera de la industria, como es el caso de los automóviles, hogares, ciudades y las mismas personas. Las labores del campo también representan una oportunidad de automatizar y optimizar procesos para mejorar calidad y ganar competitividad, hecho que hasta ahora lo han entendido muy bien países como Argentina, Estados Unidos, Alemania y Bélgica. En Colombia, por el contrario, esta oportunidad no se ha cristalizado por falta de un verdadero interés de gobierno, empresarios y universidades, y nos ha llevado a tener la misma estructura productiva agrícola desde hace más de 20 años.

La transferencia, apropiación y desarrollo de tecnología para el sector agropecuario representan tareas que deben fortalecerse para innovar procesos en el campo colombiano y alcanzar una mayor productividad, además de su expansión. La tecnología robótica integra conocimientos de ingenierías mecánica, electrónica y de sistemas, primordialmente, y sus aplicaciones, que en un principio se pensaron para el sector industrial, hoy en día se abren paso en hogares, clínicas, ciudades, así como en el campo.

Aplicaciones recientes de la robótica automatizan procesos en los que todavía es indispensable el ser humano, pero que dado su carácter repetitivo pueden ser hechos por robots inteligentes. Este es el caso de la agroindustria, campo en el que, gracias a la sinergia de diferentes tecnologías, se pueden desarrollar robots autónomos que apoyen actividades de siembra, cosecha, recolección, selección, almacenamiento, transporte y procesamiento de productos agrícolas.

La Decanatura de Ingeniería Electrónica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito ha venido impulsando la aplicación de la ingeniería en el diseño de equipos y herramientas para apoyar las labores agrícolas del pequeño campesino de la región cundiboyacense. Después de identificar en el campo oportunidades para diseñar, implementar y probar soluciones tecnológicas que mitiguen problemas de los pequeños productores de papa y pasto, hemos enfocado nuestro esfuerzo en fortalecernos en el dominio de nuevos conocimientos

que puedan aplicarse al campo colombiano. Uno de estos conocimientos es el de tecnologías de robótica móvil terrestre (*rovers*) y aérea (drones o vehículo aéreo no tripulado, VANT), que unido al proveniente del procesamiento de información facilite la invención de máquinas inteligentes que apoyen la labor del campesino.

En este artículo se hace una corta revisión de las oportunidades que el campo representa para el desarrollo del país, de las posibilidades que se tienen para hacer innovaciones e investigaciones ajustadas a las necesidades de éste, y de los retos que se nos plantean a las universidades para lograrlo. Así mismo, se exponen las experiencias que se han tenido con proyectos de investigación como el titulado “Evaluación de la tecnología Plexil en ambientes robóticos del contexto nacional”, cuyo objetivo principal fue transferir y adaptar la tecnología de fuente abierta Plexil (desarrollado por la NASA para automatización en misiones no tripuladas) al contexto académico y productivo colombiano.

AGROINDUSTRIA Y OPORTUNIDADES DE INNOVACIÓN E INVESTIGACIÓN

Según estudios, el campo colombiano tiene el potencial para llevar al país a ser una de las siete naciones donde se siembre el 50 % de los alimentos necesarios en el mundo. Por tal motivo, si queremos alcanzar esta meta, apoyar el desarrollo productivo y mejorar la competitividad son acciones impostergables. Debemos entonces tomar en serio al campo colombiano, redoblando esfuerzos para no sólo ampliar la extensión de suelo cultivado, sino también para proveer a los 7,1 millones de hectáreas ya productivas, y el millón que se espera sembrar, de sistemas de riego eficientes, acceso a vías e infraestructura de calidad y mejores precios de los insumos agrícolas.

La automatización en general y la robótica en particular son tecnologías establecidas en los sectores manufactureros, entre éstos la alimentación, donde aspectos como la higiene, la reducción de los costos de producción o el aumento de la productividad, pueden verse beneficiados con el uso de robots que realizan de manera eficiente tareas de *pick & place*, empaquetado, clasificación etc. Pero si bien la robótica dedicada a la manufactura, denominada *robótica industrial*, es una tecnología altamente implantada desde los años setenta, la llamada *robótica de servicios*, en la que se trabaja de manera

intensa desde la década de los ochenta, tiene todavía muchas dificultades por resolver. Dentro de este último grupo de robots se encuentran los agrícolas, tanto para realizar labores al aire libre como bajo cubierta.

Los procesos agroindustriales incluyen, entre otras actividades, las de siembra, cosecha, recolección, selección, almacenamiento, transporte y procesamiento. Las oportunidades de innovar o investigar con el propósito de mejorar o de optimizar dichos procesos son diversas. Sin embargo, para llegar con soluciones concretas se requiere primero atender algunos retos de ingeniería relacionados con el agro, tales como:

- Caracterizar la vegetación y detección de malas hierbas.
- Desarrollar dosificadores de variables para productos fitosanitarios y fertilización inteligentemente.
- Instalar redes de sensores para variables de cultivo.
- Implementar sistemas de información para variables de cultivo.
- Aplicar métodos para detectar y cuantificar la deriva de pesticidas en el aire.
- Desarrollar vehículos autónomos terrestres y aéreos para el terreno agrícola.

Teniendo en cuenta solamente este último reto, hay que integrar componentes tecnológicos tales como sistemas de navegación de alta precisión, sistemas de visión por computador, plataformas robóticas, manipuladores robóticos, y sistemas de seguridad para no afectar personas, animales y vegetación. Este trabajo ya se está desarrollando en la Escuela mediante proyectos del semillero de agrónoma y de investigación de los gru-

pos Electrónica y CTG-Infornática. Con este objetivo recientemente se terminó el proyecto “Evaluación de la tecnología Plexil en ambientes robóticos del contexto nacional”, en el que se exploró una tecnología de automatización de robots –normalmente usada para sistemas de misión crítica– en el contexto de los cultivos de papa [14,15]. A continuación se explican los principios de las tecnologías utilizadas en el proyecto y los posibilidades que se tienen para seguir las integrando en innovaciones agroindustriales.

TECNOLOGÍA DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS

Para hacer tareas de navegación en los cultivos y con propósitos como siembra autónoma, fertirrigación, irrigación, recolección de información, deshierbado, recolección y selección de producto, o almacenamiento, se pueden utilizar robots inteligentes de tres tipos: aéreos, terrestres o fijos. A continuación se presenta un ejemplo de cada uno; los primeros son de tipo *rover*, que recorren los terrenos cultivados; otros son de tipo dron, que apoyan la labor de vigilancia o fertirrigación, principalmente, y por último los fijos, que sirven para hacer labores de seguimiento y caracterización de muestras de cultivo.

En la investigación realizada en el grupo Electrónica se contemplan los tres tipos de vehículos. En el caso de los *rovers*, se han venido adecuando para emplearlos en cultivos de papa y en tareas de siembra y reconocimiento (figura 1). Se presentan también, a manera de ejemplo, las condiciones de un cultivo de papa para las cuales se están diseñando los robots (figura 2a), con una estructura como la mostrada (figura 2b).



Figura 1. Vehículos autónomos de diversos tipos: a) terrestre (*rovers*); b) aéreo (drones) y c) fijo



Figura 2. a) Cultivo de papa. b) Estructura utilizada para el robot, kit 6x6 MINDS-i.

Además de la estructura del robot, es necesario disponer de un sistema electrónico de procesamiento central, en el que se acopie la información del entorno y del robot mismo, con el fin de tomar decisiones en función de un plan de trabajo previamente establecido. Para lograr la anhelada autonomía el robot, éste debe tener la capacidad de a) obtener información del medio ambiente, b) ejecutar sus misiones sin la intervención humana, c) moverse a través de su entorno de trabajo, y d) evitar situaciones de riesgo para las personas o elementos del entorno. Con el propósito de lograr estas capacidades, se dotó al robot del proyecto de los siguientes módulos, adosados a la estructura de la figura anterior (figura 2b):

1. Actuador para hacer misiones de riego o fertilización.
2. Sistema de alimentación.
3. *Board* de Control Central (*Single Board Computer*, SBC) y *boards* de motores y sensores.
4. Cámaras.
5. Sensores de distancia.
6. Sensor de Lidar (*Laser Imaging Detection and Ranging*).

Seguidamente se presenta un prototipo de robot para exploración de cultivos de papa que se está desarrollando con el apoyo del grupo de investigación CTG-Informática de la Decanatura de Ingeniería de Sistemas (figura 3).



Figura 3. Prototipo de robot rover para exploración de cultivos.

La inteligencia de los *rovers* se gestiona mediante la programación que se tenga dispuesta en la SBC. Para esta aplicación se utilizó Plexil (*Plan Execution Interchange Language*), nombre que hace referencia tanto al lenguaje para la representación de los planes para la automatización, como a la tecnología para la ejecución de éstos en sistemas reales o simulados. Se ha utilizado en robótica, control de los vehículos no tripulados, automatización de las operaciones en los hábitats humanos, y sistemas y simulaciones que implican agentes de *software* inteligentes. Plexil está basado en el paradigma de programación síncrono, nacido en los años ochenta, ante la necesidad de poder certificar, mediante un proceso matemático formal, la correctitud del diseño y la implementación de sistemas críticos, como los usados por la industria aeronáutica y la médica.

A continuación se presenta una estructura funcional del robot propuesto en el proyecto de investigación, en la que se pueden identificar otras *boards* que colaboran de forma distribuida con la SBC para la gestión de los sensores y los motores. El protocolo de comunicación dispuesto entre los componentes fue el de *Inter-Integrated Circuit* o *I2C* (figura 4).

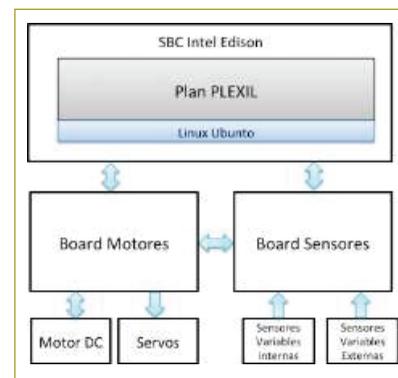


Figura 4. Arquitectura del sistema robot rover.

OTRAS TECNOLOGÍAS NECESARIAS

Algunas otras tecnologías necesarias para continuar el perfeccionamiento del robot experimental, además de los retos planteados para los robots en agroindustria, son:

Visión por computador

La caracterización del entorno de trabajo de un robot se puede apoyar en el procesamiento de imágenes. Tareas

como la caracterización de la vegetación y detección de malas hierbas se puede hacer mediante el procesamiento de imágenes RGB o multispectrales. Estas cámaras pueden estar dispuestas sobre robots terrestres o drones. En la figura siguiente se puede apreciar una imagen aérea de un terreno y su respectivo índice NVDI (índice de vegetación de diferencia normalizada), utilizado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Este tipo de información apoya el seguimiento de los cultivos para establecer su estado, o la presencia de estrés hídrico nutricional o de enfermedades (figura 5).

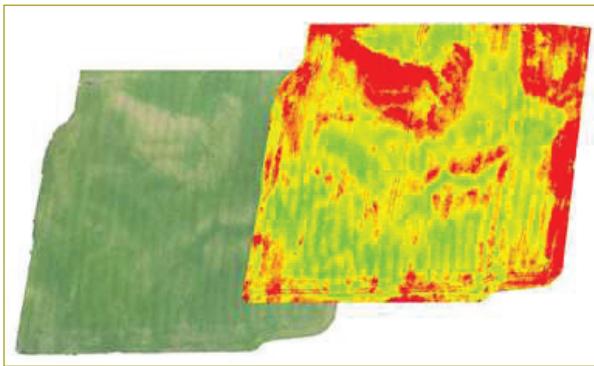


Figura 5. Imagen de cámara multispectral. Tomada de [6].

La reconstrucción de modelos en 3D de cultivos es otra alternativa que se puede tener con las imágenes aéreas. A renglón seguido se presenta una estimación de las dimensiones de cultivos hechas con este tipo de imágenes, cuyo principal beneficio es que permite establecer dimensiones o hacer inspección remotamente (figura 6).



Figura 6. Estimación de las dimensiones de cultivos leñosos obtenida a partir de las imágenes adquiridas por un dron. Adaptada de [4].

Una última aplicación que se quiere destacar de la visión por computador es la identificación y caracterización de componentes del cultivo (frutos, tallos, hojas). A continuación se presenta un ejemplo del procesamiento de imágenes de frutos que se pueden tomar desde robots terrestres. Las tareas de segmentación y clasificación de estas imágenes pueden permitir a las máquinas tomar decisiones con múltiples fines, como recolección, detección de enfermedades, o defectos en los frutos (figura 7).



Figura 7. Procesamiento de imagen de frutos. Tomada de [5].

Sensores ambientales y de terreno

La detección de variables ambientales como temperatura, humedad y velocidad del viento, radiación solar, y lluvia, además de aquellas de terreno como temperatura y humedad, son fundamentales para conocer las condiciones en que se desarrollan los cultivos. Estas variables son el insumo principal para los sistemas de control automático en cultivos cubiertos y algunos al aire libre, pero se han convertido en un reto para los innovadores en ingeniería electrónica, ya que su costo en el comercio es muy elevado, por lo que hay que buscar alternativas más económicas.

CONCLUSIONES

El campo colombiano es una oportunidad para hacer innovaciones e investigaciones que ayuden, con equipos o servicios, a los pequeños y medianos cultivadores, con el propósito de mejorar su productividad y expandir las áreas de cultivo. Campesinos de regiones como la cundiboyacense pueden verse apoyados con tecnología agroindustrial que mejore procesos de siembra, cosecha, recolección, selección, almacenamiento, transporte y procesamiento.

Para lograr un impacto satisfactorio del sector agropecuario es necesario, por un lado, conocer y caracterizar las necesidades reales de los afectados, y por otro, dominar las tecnologías indispensables para producir las innovaciones planteadas. Para conseguir el primer propósito nos hemos enfocado en los cultivos de papa y pasto, y por esto se viene trabajando con expertos de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (UDCA). Para atender el segundo se han aprovechado recursos de convocatorias internas para conocer y adecuar diversas tecnologías a las necesidades del agro.

La robótica móvil y área es una alternativa muy interesante de explorar y aplicarla al campo. La automatización de procesos se sigue expandiendo y su aplicación en el campo se hace necesaria en países como el nuestro. Los *rovers* y drones tienen un potencial muy grande para desempeñarse en el campo. Otras tecnologías relacionadas con las imágenes y el procesamiento de información también se convierten en una interesante oferta para incorporarla en soluciones innovadoras agroindustriales.

Con los resultados del proyecto antes descrito, en el que se comprobó la viabilidad de explotar tecnologías para la creación de soluciones robustas de automatización como Plexil, la Escuela está frente a la posibilidad de crear soluciones que impacten al sector agropecuario colombiano. No obstante, esta es aún una primera aproximación a un robot que sea realmente aplicable a un entorno agrícola real, y es necesario seguir avanzando en darle a éste capacidades para técnicas como la agricultura de precisión, y de navegabilidad para cultivos diferentes de los expuestos en este documento, tales como los de cebolla, frutos u hortalizas.

Los autores agradecen la ayuda de la Escuela Colombiana de Ingeniería en el desarrollo de este proyecto, al cual apoyó con recursos de la convocatoria interna de investigación 2014/2015.

REFERENCIAS

- [1] Barguil, D. (2016). El agro en Colombia, una mina de oro. Revista *Dinero*, 4 de octubre. <http://www.dinero.com/opinion/columnistas/articulo/el-agro-en-colombia-una-mina-de-oro-por-david-barguil/222267>.
- [2] <http://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/151745-El-uso-de-robots-en-tareas-agricolas.html>. Tomado febrero 27 de 2017.
- [3] Benveniste, A., et al. (2003). The synchronous languages 12 years later. *Proceedings of the IEEE*, 91(1).
- [4] J. Torres-Sánchez, F. et al. (2015). High-Throughput 3-D Monitoring of Agricultural-Tree Plantations with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology. *PLOS ONE*, 10(6): e0130479. doi: 10.1371/journal.pone.0130479.
- [5] <http://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/151745-El-uso-de-robots-en-tareas-agricolas.html>. Tomado febrero 27 de 2017.
- [6] <http://www.oriondata-i.com/home/index.php/vegetacion-ndvi>. Tomado el 28 de febrero.
- [7] Benveniste, A. et al. (2003). The synchronous languages 12 years later. *Proceedings of the IEEE*, 91(1).
- [8] Benveniste, A., Le Guernic, P. & Jacquemot, C. (1991). Synchronous programming with events and relations: the Signal language and its semantics. *Science of Computer Programming*, 16(2):103-149.
- [9] Dowek, G., Muñoz, C. & Pasareanu, C. (2007). A formal analysis framework for Plexil. In *Proceedings of 3rd Workshop on Planning and Plan Execution for Real-World Systems*.
- [10] Dowek, G., Muñoz, C. & Rocha, C. (2009). Rewriting logic semantics of a plan execution language. *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*, 18:77–91.
- [11] González, J.P. et al. (2012). Movilidad de pesticidas en aguas superficiales empleados en agricultura y riesgos para la salud humana en la zona centro del departamento de Boyacá (Colombia). *L'esprit Ingénieux*, 3(1).
- [12] Won Suk Lee, Slaughter, D.C. & Giles, D.K. (1999). Robotic weed control system for tomatoes. *Precision Agriculture*, 1(1):95-113.
- [13] Morris, P., Schwabacher, M., Dalal, M. & Fry, D. (2013). *Embedding temporal constraints for coordinated execution in habitat automation*.
- [14] Cadavid, H.F. & Chaparro, J. A. (2016). *Hardware and software architecture for Plexil-based, simulation supported, robot automation*. Robotics and Automation (CCRA), IEEE Colombian Conference on IEEE.
- [15] Cadavid, H.F. & Chaparro, J.A. (2016). Control autónomo de robots de aplicación agrícola con Plexil. XXV Congreso Argentino de Control Automático (AADECA 2016)(Buenos Aires, 2016).

Efecto de la carbonatación sobre las propiedades físicas de un agregado reciclado fino comercial

Effect of carbonation on the physical properties of a commercial fine recycled aggregates

ÁLVARO GUZMÁN APONTE¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Ingeniero de Materiales. Doctorado en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Materiales. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Ingeniería Industrial. Centro de Investigaciones en Manufactura y Servicios (Cimser), Bogotá, Colombia.

2. Ingeniera civil. Maestría en Estructuras. Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesora asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Ingeniería Industrial, Grupo de Investigación en Estructuras y Materiales. Bogotá, Colombia.

alvaro.guzman@escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 22/02/2017 Aceptado: 22/03/2017

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

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la caracterización física de agregado reciclado fino (ARF) comercial y el efecto del uso del proceso de carbonatación para mejorar sus propiedades físicas. Antes y después del proceso de carbonatación, se determinaron las propiedades físicas de los agregados reciclados finos comerciales, incluyendo la absorción de agua y la densidad. Se evidenció que la carbonatación no causa un cambio marcado en la densidad del ARF, pero sí ocasiona una reducción significativa de la absorción de los ARF (7,3 y 3,1 % en ARF y ARFC-20, respectivamente). Además, en las condiciones de carbonatación utilizadas en esta investigación (concentraciones de CO₂ del 10 %, humedad relativa del 65 % y temperatura de 25 °C), tiempos de exposición a carbonatación mayores de quince días (ARFC-15) no evidencian un cambio marcado en las propiedades físicas de absorción y densidad de los ARF.

Palabras claves: agregado reciclado fino comercial, carbonatación, absorción de agua, concreto.

Abstract

In this paper, the results of the physical characterization of commercial fine recycled aggregates (FRA) and the use of a carbonation process to enhance their properties are presented. Before and after the laboratory carbonation process, the physical properties of the FRA, including water absorption and density were estimated. Carbonation showed no significant changes in density values, but resulted in reduction in water absorption values (7.3% and 3.1% in ARF and ARFC-20, respectively). Moreover, under the carbonation conditions (10% CO₂, 65% HR and 25 °C) exposure times greater than 15 days (ARFC-15) did not show a marked change in the physical properties (absorption and density) of the RFA.

Keywords: commercial fine recycled aggregates, carbonation, water absorption, concrete.

INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción es una de las grandes fuentes de generación de emisiones de dióxido de carbono (CO_2), por lo que contribuye de manera significativa al calentamiento global (Yamasaki, 2003; Rehan & Nehdi, 2005). En Europa, por ejemplo, la construcción y la operación de las edificaciones representan entre el 36 y el 40 % del total de la energía consumida y del CO_2 emitido en ese continente (Urge, 2007; Airaksinen & Matilainen, 2011), mientras que en Estados Unidos constituye el 54 % (Guggemos & Horvath, 2005). Por otra parte, dado que en el concreto los agregados ocupan entre el 60 y el 75 % de su volumen (Kosmatka et al., 2002), el sector de la construcción ha sido catalogado como uno de los grandes consumidores de recursos naturales. Bleischwitz & Bahn-Walkowiak (2011) estimaron que la demanda mundial de agregados es de casi 20.000 millones de toneladas al año, con un crecimiento proyectado del 4,7 % anual.

A escala mundial, cada año se producen millones de toneladas de residuos provenientes de las actividades de construcción y demolición (RC&D), de los cuales se considera que el 50 % corresponden a residuos de concreto (Li, 2002). En Bogotá, en el año 2009, se produjeron aproximadamente 12 millones de toneladas de RC&D, el equivalente a 70 torres Colpatria (Méndez, 2011), que ocasiona impactos negativos en la salud, el espacio público y el medio ambiente (Méndez, 2011; Pinzón, 2013).

Con el propósito de que los centros urbanos alcancen un escenario sustentable y resiliente, la industria de la construcción debe implementar prácticas sostenibles para minimizar los impactos ambientales en todas las fases del ciclo de vida de la estructura. Es así como el reciclaje de los residuos de demolición y construcción del concreto, para la manufacturación de agregados, se constituye en un valioso mecanismo que permite la preservación de los recursos naturales y el ahorro de energía incorporada en los materiales empleados en la obra, contribuyendo a la construcción de estructuras amigables con el medio ambiente (Roussat et al., 2009).

La producción y uso de agregados reciclados de concreto (ARC) es una práctica común en países desarrollados. En Europa, Alemania representa el país con mayor producción de ARC, con una tasa anual cercana a 60 millones de toneladas (Mt), seguida por el Reino Unido con 49 Mt, los Países Bajos con 20 Mt y Francia

con 17 Mt (European Aggregates Association, 2012). Dosho (2007) reportó que en Japón se registra una tasa de aproximadamente 98 % de reciclaje de RC&D de concreto, para manufacturar ARC. Sin embargo, varios autores han reportado que las propiedades mecánicas y de durabilidad de especímenes de concreto, elaborados con ARC, son inferiores en comparación con especímenes elaborados con agregados naturales (Ravindrajah & Tam, 1985; Khatib, 2005; Poon & Chan, 2007; Liu et al., 2011).

En los últimos años, se han desarrollado varias investigaciones con el fin de implementar novedosas metodologías verdes que disminuyan las emisiones de CO_2 generadas por el sector de la construcción. El desarrollo e implementación de energías renovables, así como la fabricación de cementos ecológicos, contribuyen a reducir las emisiones de dióxido de carbono, pero no son suficientes para mitigar totalmente los impactos climáticos producidos por las actividades de la construcción (Fernández et al., 2004). Es así como se ha desarrollado una tecnología para captar y almacenar CO_2 en residuos industriales alcalinos (DIA, por su sigla en inglés) para utilizarlos posteriormente en la fabricación de materiales de construcción, mediante un proceso innovador denominado tecnología de carbonatación acelerada (TCA), que permite fijar el dióxido de carbono en la estructura interna de los DIA ricos en óxidos de calcio (CaO) y óxidos de magnesio (MgO), con la ventaja de que los procesos térmicos involucrados en el procesamiento de los DIA, como la calcinación del clinker del cemento, aumentan la reactividad de sus componentes (CaO , MgO , entre otros), facilitando la fijación del CO_2 (Huijgen et al., 2006; Sanna et al., 2012; Bobicki et al., 2012).

La carbonatación es un fenómeno natural que afecta con frecuencia los materiales cementicios y puede tener efectos perjudiciales sobre estructuras de concreto reforzadas con acero. Por otra parte, se ha demostrado que la carbonatación actúa positivamente en la inmovilización de suelos contaminados con metales pesados y otros residuos (Macías et al., 1997; Walton et al., 1997; Bin-Shafique et al., 1998; Valls & Vázquez, 2001; Venhuis & Reardon, 2001). La inmovilización de metales tóxicos se produce a través de varios mecanismos, ya sea debido al bajo ambiente alcalino proporcionado por las reacciones ocurridas durante la carbonatación, en la cual la mayoría de los metales exhiben su mínima

solubilidad; la conversión de metales en carbonatos (BaCO_3 , PbCO_3 , ZnCO_3), de menor solubilidad; la afinidad de ciertos metales por la calcita (CaCO_3), con la subsecuente formación de nuevas fases minerales, o por medio de encapsulación física, en la que metales como Ni y Cr son retenidos en el sistema de poros refinado (la calcita bloquea y rellena el sistema de poros) (Fernández et al., 2004).

La carbonatación acelerada de desechos peligrosos es una versión acelerada y controlada del proceso que ocurre naturalmente. La mezcla sólida es carbonatada en un ambiente gaseoso rico en dióxido de carbono (CO_2), el cual promueve el rápido endurecimiento del producto en minutos (Lange, 1997). En Inglaterra se ha construido una planta para la producción de agregados carbonatados elaborados con diferentes clases de desechos industriales ricos en CaO, en un sitio dispuesto para botadero de basuras domésticas y comerciales. El dióxido de carbono generado por dichas basuras se recolecta en reactores, con el fin de usar este CO_2 para el procesamiento de los agregados (Gunning, 2011); así, los ARC representan una alternativa interesante para almacenar dióxido de carbono, debido a que el alto contenido de calcio presente en el mortero adherido al agregado le permite fijar CO_2 hasta un 16,5 % de su peso propio, siguiendo el mecanismo de reacción reportado por Fernández et al. (2004) y Sanna et al. (2012).

Bobicki et al. (2012) estimaron que los ARC pueden captar hasta 60 Mt de CO_2 cada año (cálculos realizados teniendo en cuenta los RD&C de concreto generados en la Unión Europea, China y Estados Unidos). Autores como Engelsen et al. (2005) y Jonsson y Wallevik (2005) demostraron en sus investigaciones el mejoramiento de las propiedades mecánicas y de durabilidad de los ARC después de haber sido expuestos al proceso de carbonatación acelerada, presentando cambios en la estructura de poros, acompañados por un ligero incremento en la densidad, y una disminución de la porosidad y absorción de agua (Kou & Poon, 2012; Kou et al., 2012; Kou et al., 2014). El cambio en el sistema de poros puede explicarse por el incremento en volumen de la calcita (CaCO_3), compuesto resultante de la reacción entre el CO_2 y las fases que contienen calcio, de aproximadamente 11,7 % en relación con el volumen del hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) (Pan et al., 2012). Adicionalmente, la calcita (CaCO_3) bloquea el sistema de poros debido a su baja solubilidad (Fernández et al., 2004).

Kou et al. (2014) evaluaron el comportamiento de mezclas de concreto elaboradas con agregados gruesos reciclados carbonatados (AGRC) y no carbonatados (AGR), observando que las mezclas de concreto preparadas con AGRC presentaron mejores resistencias que las mezclas de concreto confeccionadas con AGR, registrando valores ligeramente inferiores a la muestra control (100 % de agregados gruesos naturales). Por otra parte, Kou y Poon (2012) estudiaron diferentes factores que tienen influencia en el proceso de carbonatación de los ARC, tales como el tiempo de curado, el tamaño de las partículas y el contenido de humedad de los agregados reciclados, y encontraron que los mayores valores de absorción de agua logran mayor relación de ganancia de masa y porcentaje de carbonatación a causa de la mayor cantidad de porosidad abierta de los ARC, que facilita el acceso para que el CO_2 penetre dentro del ARC. Además, los ARC con tamaño de partícula más fina y mayor superficie específica pueden absorber un mayor porcentaje de CO_2 durante el proceso de carbonatación.

La carbonatación del mortero adherido al ARC es posible debido a que la porción de cemento antiguo contiene hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), por lo que puede reaccionar con el dióxido de carbono. Básicamente, la reacción se describe como se indica a continuación (Johannesson & Utgenannt, 2001):



Otros productos de hidratación, tales como el gel de CSH (silicato de calcio hidratado), también parecen convertirse a carbonato de calcio y agua, y un gel de CSH modificado con una relación rebajada de Ca/Si (Richardson et al., 1993) o un mayor grado de gel de sílice polimerizada (Slegers & Rouxhet, 1976; Yousuf et al., 1993).

Por otra parte, teniendo en cuenta que la industria cementera es responsable de generar aproximadamente un 5 % del total de las emisiones globales antropogénicas de dióxido de carbono (CO_2) (Hendriks et al., 1998; Humphreys & Mahasenan, 2002). Investigadores han enfatizado en la habilidad que tienen los materiales basados en cemento, de absorber casi la misma cantidad de CO_2 , que fue químicamente liberada a la atmósfera durante el proceso de calcinación del cemento. Se sugiere así que la cantidad captada de CO_2 en el concreto

debería considerarse en las evaluaciones ambientales, de la misma manera como la absorción de CO₂ (por proceso de fotosíntesis) es estimada en el análisis del ciclo de vida de las estructuras construidas con materiales de madera (Lagerblad, 2005; Collins, 2010). Por ello es de considerar la inminente necesidad de implementar estrategias que ayuden a combatir el cambio climático en Colombia, y debido a la inexistente información en la región acerca del comportamiento de los ARC carbonatados que mejoran sus propiedades físicas y químicas, se podría facilitar su reutilización en una variedad de aplicaciones de construcción, como losas de concreto para pavimentos. Con base en lo anterior se planteó la presente investigación, que se enfocó en evaluar las principales propiedades físicas de los agregados reciclados finos (ARF) comerciales, tratados con la innovadora tecnología de “carbonatación acelerada”, con respecto a agregados finos naturales ordinariamente empleados en la fabricación de concretos convencionales, y así poder evaluar la viabilidad de su uso. Esto permite considerar la carbonatación de los ARF como una posible alternativa que contribuya a su valorización sostenible y al cerramiento del ciclo de carbono en las estructuras de concreto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El RC&D empleado en esta investigación fue agregado fino comercializado en Bogotá por una empresa de la región. El agregado fino natural (AFN) correspondió a un agregado fino proveniente del municipio de Tabio (Cundinamarca).

Metodología

La metodología desarrollada en la presente investigación consistió en un muestreo y una homogeneización de los agregados finos reciclados comerciales. Una vez homogeneizados, se sometieron a carbonatación (agregado reciclado fino comercial carbonatado (ARFC)) haciendo uso de una cámara de carbonatación de laboratorio cuyas condiciones se mencionan a continuación: concentraciones de CO₂ del 10 %, temperatura de 25 °C y una humedad relativa del 65 %. Se escogieron estas condiciones porque el Grupo de Investigación

en Estructuras y Materiales de la Escuela ya las había trabajado en investigaciones anteriores.

En aras de evidenciar el impacto de la carbonatación sobre los ARF, y conocer el tiempo óptimo de carbonatación, se determinaron sus propiedades físicas (densidad y absorción) a tiempos de exposición de 0, 3, 5, 10, 15 y 20 días. La caracterización de los ARF, AFN y aquellos ARFC, se hizo con base en las normas técnicas mencionadas seguidamente (tabla 1).

Tabla 1
Normas empleadas en la caracterización de los agregados

Ensayo	Ensayo
Análisis granulométrico	NTC 77, ASTM C136
Masa unitaria de los agregados	NTC 92
Impurezas orgánicas	NTC 127
Densidad, absorción y porosidad	NTC 237
Contenido de humedad	NTC 1776

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Caracterización física de los agregados finos sin carbonatar

Macroscópicamente, los agregados reciclados finos comerciales presentan similitudes con los agregados finos naturales; sin embargo, es importante conocer su distribución granulométrica para saber si se encuentran dentro de las curvas límites para agregado fino que deben utilizarse para concreto (acorde con la norma ASTM C-33).

En la figura siguiente se puede ver que el ARF muestra una curva de distribución similar a aquella especificada por la norma ASTM C-33, lo que permite denotar que el ARF presenta una distribución granulométrica adecuada para emplearlo en la fabricación de concretos; igualmente, es posible observar que la distribución granulométrica del AFN posee gran cantidad de partículas gruesas, encontrándose alejada del comportamiento especificado para el agregado fino empleado en concreto (norma ASTM C-33) (figura 1).

Varios autores han mencionado que el mortero de cemento adherido en los agregados reciclados lleva a un agregado de calidad inferior (menor densidad, mayor absorción, mayor porosidad) en comparación con el agregado natural, particularmente en la fracción más

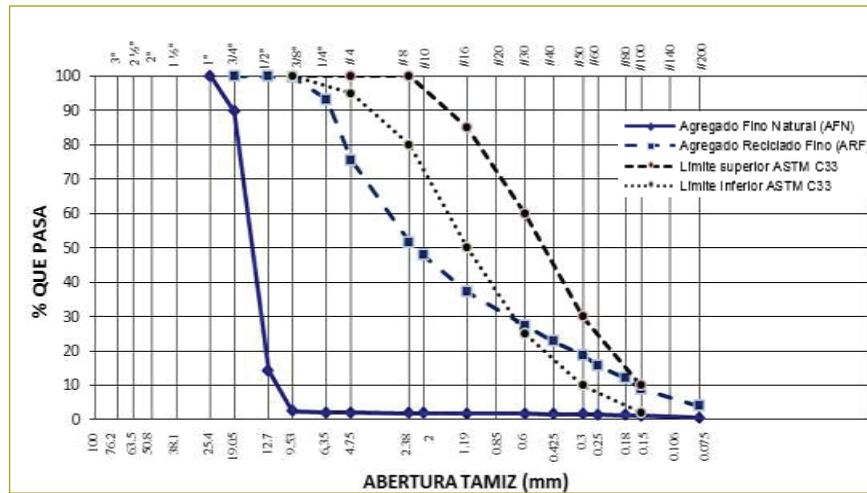


Figura 1. Curvas de distribución granulométrica de los agregados finos empleados (ARF y AFN). Fuente: Autores.

fina (Geng & Sun, 2013; McNeil & Kang, 2013; Kou et al., 2014). En la tabla siguiente se puede corroborar lo anteriormente mencionado, evidenciando que el ARF presenta menor valor de densidad y mayor absorción (2,59 g/cm³ y 7,3 %, en ese orden), en comparación con los AFN (2,64 g/cm³ y 2,1 %, respectivamente (tabla 2).

La mayor absorción de agua de los ARF llevará a que las mezclas de concreto en estado fresco que los incorporen requieran mayor contenido de agua que aquellas mezclas de concreto con agregado natural, lo que probablemente conduzca a una alta porosidad en el concreto. Como resultado de esto, el concreto endurecido que incorpore ARF tendrá una pobre durabilidad, baja resistencia y bajo módulo elástico (Geng & Sun, 2013). Con base en lo anterior, sería importante

poder reducir la absorción de agua de los ARF al valor mínimo permisible.

Caracterización física de los agregados finos reciclados carbonatados

Dado que uno de los factores con mayor relevancia en la caracterización de los ARF es su elevada capacidad de absorción de agua en comparación con los AFN, (es de esperar que la carbonatación de los ARF disminuya la absorción de agua de éstos (Kou & Poon, 2012; Kou et al., 2012; Kou et al., 2014), por lo que el menor valor de absorción de agua se estableció como el parámetro óptimo para mejorar físicamente los ARF.

Tabla 2
Características físicas de los agregados finos (AFN y ARF)

Ensayo	Norma	AFN	ARF
Densidad aparente (Bulk) (g/cm ³)	NTC 237	2,64	2,59
Absorción (%)	NTC 237	2,1	7,3
Masa unitaria suelta	NTC 92	1,58	1,40
Masa unitaria compacta	NTC 92	1,70	1,74
Módulo de finura	NTC 77	3,4	3,8
Tamaño máximo nominal	NTC 77	3/8" (9,5 mm)	3/8" (9,5 mm)
Tamaño máximo	NTC 77	1/2" (12,7 mm)	3/8" (9,5 mm)
Impurezas orgánicas	NTC 127	#2	#2

Fuente: Autores.

A renglón seguido se aprecian las propiedades físicas (densidad y absorción) de los ARF, AFN y aquellos ARF expuestos a carbonatación a tiempos de 3, 5, 10, 15 y 20 días (ARFC-3, ARFC-5, ARFC-10, ARFC-15 y ARFC-20, respectivamente) (figuras 2 y 3).

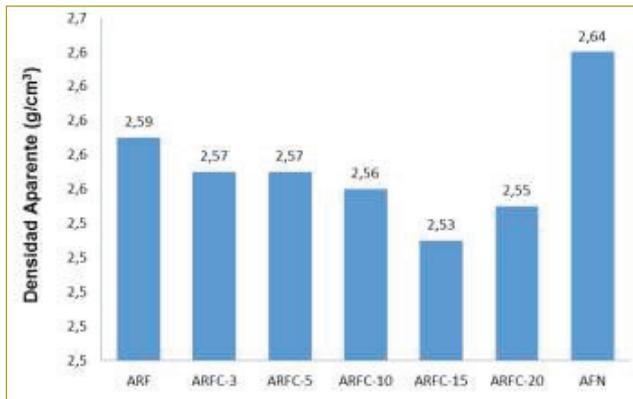


Figura 2. Densidad de los agregados finos (ARF, AFN y ARFC). Fuente: Autores.

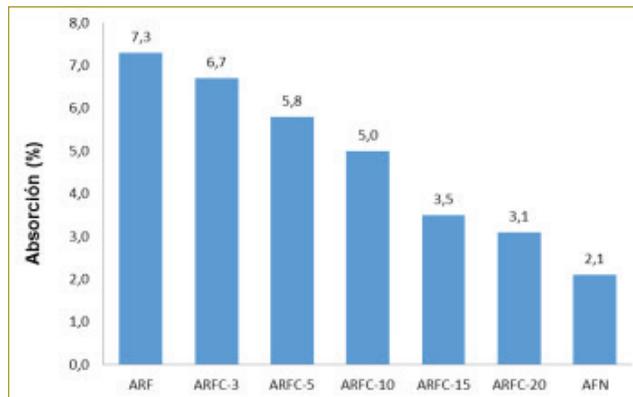


Figura 3. Absorción de los agregados finos (ARF, AFN y ARFC). Fuente: Autores.

En general, se observa que el incremento del tiempo de carbonatación de los ARF no conduce a cambios marcados en la densidad, pero sí en la reducción de la absorción de agua del ARF (figuras 2 y 3). Este comportamiento es acorde con el mencionado por autores como Zhang et al. (2014), quienes indicaron que no hay cambios marcados en la densidad de los agregados reciclados después de ser carbonatados, mientras que propiedades como la absorción de agua y la porosidad se ven reducidas. Se evidencia, por tanto, que la absorción de agua se reduce hasta un mínimo de 3,1 %, a tiempos

de exposición a carbonatación de 20 días; no obstante, comparada con la absorción a 15 días de exposición a carbonatación (3,5 %), no muestra un cambio marcado. Este comportamiento podría atribuirse al hecho de que los productos de la carbonatación llenan los poros por carbonatación del hidróxido de calcio, que es una de las principales reacciones, acompañada por un 11,8 % de incremento en el volumen del sólido (acorde con la ecuación 1) (Johannesson & Utgenannt, 2001).

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de las propiedades físicas (densidad y absorción), resulta viable pensar en el uso de agregados reciclados finos (ARF) comerciales y aquellos carbonatados (ARFC), para la fabricación de concretos convencionales, ya que esto permite generar beneficio económico y reducir el impacto sobre el medio ambiente.

Los resultados experimentales permitieron confirmar que el tratamiento de carbonatación no causa un cambio marcado en la densidad del ARF, pero sí ocasiona una reducción significativa de la absorción de los ARF.

Tiempos de exposición a carbonatación de los ARF superiores a 15 días (ARFC-15) no evidencian un cambio marcado en las propiedades físicas de absorción y densidad de los ARF.

FINANCIAMIENTO

Para el desarrollo de este proyecto se contó con el apoyo económico de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Colombia), en particular de la investigación “Valoración de agregados reciclados de concreto a través de la técnica de carbonatación acelerada” (convocatoria interna de 2015).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Colombia) por el apoyo brindado para la financiación y el desarrollo de este estudio, sin lo cual el proyecto no habría podido desarrollarse.

REFERENCIAS

- Airaksinen, M. & Matilainen, P. (2011). A carbon footprint of an office building. *Energies*, 4, 1197-1210.
- Bin-Shafique, S., Walton, J., Gutiérrez, N., Smith, R. & Tarquin, A. (1998). Influence of carbonation on leaching of cementitious waste forms. *J. Environ. Eng*, 22, 463-467.
- Bleischwitz, R. & Bahn-Walkowiak, B. (2011). Aggregates and construction markets in Europe: towards a sectorial action plan on sustainable resource management. *Miner Eng*, 22, 159-176.
- Bobicki, E., Liu, Q., Xu, Z. & Zeng, H. (2012). Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(2), 302-320.
- Collins, F. (2010). Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(6), 549-556.
- Dosho, Y. (2007). Development of a sustainable concrete waste recycling system – application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing Method. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 27-42.
- Engelsen, C., Mehus, J. & Pade, C. (2005). Carbon Dioxide Uptake in Demolished and Crushed Concrete. Disponible en <http://nordicinnovation.org/Global/_Publications/Reports/2005/03018_carbon_dioxide_uptake_in_demolished_and_crushed_concrete.pdf>, Consultado el 10 de marzo de 2017. In Tech. Rep., Oslo: Norwegian Building Research Institute.
- European Aggregates Association Annual Review (2012). Brussels, Belgium.
- Fernández, M., Simons S., Hills, C. & Carey, P. (2004). A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. *Journal of Hazardous Materials*, 112(3), 193-205.
- Geng, J. & Sun, J. (2013). Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 814-820.
- Guggemos, A. & Horvath A. (2005). Comparison of environmental effects of steel and concrete-framed buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(8), 93-101.
- Gunning, J. (2011). Accelerated carbonation of hazardous wastes. Disponible en <http://gala.gre.ac.uk/7135/1/Peter_John_Gunning_Accelerated_carbonation_2011.pdf>. Consultado el 20 de marzo de 2017. In School of Science, University of Greenwich, p. 236.
- Hendriks, C., Worrell, E., De Jager, D., Blok, K. & Riemer, P. (1998). Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry. in Fourth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. Disponible en <<http://www.wbcsdcement.org/pdf/tf1/prghgt42.pdf>>. Consultado el 5 de marzo de 2017. Austria: IEA GHG R&D Program.
- Huijgen, G.R., Comans, R. & Witkamp, G. (2006). Energy Consumption and Net CO₂ Sequestration of Aqueous Mineral Carbonation. *Industry Engineering Chemistry*, 45, 184-194.
- Humphreys, K. & Mahasenan, M. (2002). Toward a sustainable cement industry. Substudy 8, climate change. Disponible en <http://www.cement.ca/images/stories/wbcsd-batelle_2002_climate_change_-_substudy_8.pdf>, Consultado el 5 de marzo de 2017. World Business Council for Sustainable Development.
- Johannesson, B. & Utgenannt, P. (2001). Microstructural changes caused by carbonation of cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 31, 925-931.
- Jonsson, G. & Wallevik, O. (2005). Information on the use of concrete in Denmark, Sweden, Norway and Iceland. Disponible en <http://www.nordicinnovation.org/Global/_Publications/Reports/2005/03018_background_report_information_on_the_use_of_concrete_in_nordic_countries.pdf>, Consultado el 5 de marzo de 2017. In Tech. Rep. Reykjavik: Icelandic Building Research Institute.
- Khatib, J. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement & Concrete*, 35, 763-769.
- Kosmatka, S., Kherkhoff, B. & Panarese, W. (2002). Design and control of concrete mixtures. Chapter 5.
- Kou, S. & Poon, C. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69-76.
- Kou, S., Zhan, B. & Poon, C. (2012). Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction Building Materials*, 28, 549-56.
- Kou, S., Zhan, B. & Poon, C. (2014). Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 45, 22-28.
- Lagerblad, B. (2005). Carbon Dioxide Uptake During Concrete Life Cycle: State of the Art. Disponible en <https://www.dti.dk/_media/21043_769417_Task%201_final%20report_CBI_Bjorn%20Lagerblad.pdf>. Consultado el 8 de marzo de 2017. Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Lange, L.C. (1997). Carbonation of Cement Solidified Hazardous Wastes. Queen Mary and Westfield College.
- Li, W. (2002). Composition Analysis of Construction and Demolition Waste and Enhancing Waste Reduction and Recycling in Construction Industry in Hong Kong. Hong Kong: Department of Building and Real Estate. The Hong Kong Polytechnic University.
- Liu, Q., Xiao, J. & Sun, Z. (2011). Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Cement & Concrete*, 241, 1050-1057.
- Macias, A., Kindness, A. & Glasser, F.P. (1997). Impact of carbon dioxide on the immobilisation potential of cemented wastes: chromium. *Cement & Concrete Research*, 27(2), 215-225.
- McNeil, K. & Kang, T. (2013). Recycled concrete aggregates: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1), 61-71.
- Méndez, S. (2011). Aprovechamiento de escombros: una oportunidad para mejorar la infraestructura de las comunidades marginadas. In II Conferencia Internacional "Gestión de Residuos en América Latina (GRAL)".
- Pan, S., Chang, E., & Chiang, P. (2012). CO₂ Capture by Accelerated Carbonation of Alkaline Wastes: A Review on Its Principles and Applications. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(5), 770-791.
- Pinzón, A. (2013). *Formulación de lineamientos para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Poon, C. & Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources Conservation and Recycling*, 50(3), 293-305.
- Ravindrarajah, R.S. & Tam, T.C. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37(130), 29-38.
- Rehan, R. & Nehdi, M. (2005). Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. *Environmental Science & Policy*, 8(2), 105-114.
- Richardson, G., Groves, G., Brought, A. & Dobson, C. (1993). The carbonation of OPC and OPC/silica fume hardened cement pastes in air under conditions of fixed humidity. *Advances in Cement Research*, 5(18), 81-86.
- Roussat, N., Dujet, C. & Méhu, J. (2009). Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis. *Waste Management*, 29(1), 12-20.

Sanna, A., Dri, M., Hall, M. & Maroto-Valer, M. (2012). Waste materials for carbon capture and storage by mineralisation (CCSM) – A UK perspective. *Applied Energy*, 99, 545-554.

Slegers, P. & Rouxhet, P. (1976). Carbonation of the hydration products of tricalcium silicate. *Cement and Concrete Research*, 6(3), 381-388.

Urge, D. (2007). Climate change mitigation in the building sector: the findings of the 4th Assessment report of the IPCC. Disponible en <<https://www.ipcc.ch/pdf/presentations/poznan-COP-14/diane-urge-vorsatz.pdf>>. Consultado el 1 de marzo de 2017. Center for climate change and sustainable energy policy.

Valls, S. & Vázquez, E. (2001). Accelerated carbonation of sewage sludge–cement–sand mortars and its environmental impact. *Cement & Concrete Research*, 31(9), 1271-1276.

Venhuis, M.A. & Reardon, E.J. (2001). Vacuum method for carbonation of cementitious waste forms. *Environ. Sci. Technol*, 35(20), 4120-4125.

Walton, J., Bin-Shafique, S., Smith, R., Gutiérrez, N. & Tarquin, A. (1997). Role of carbonation in transient leaching of cementitious waste forms. *Environ. Sci. Technol*, 31(8), 2345-2349.

Yamasaki, A. (2003). An Overview of CO₂ Mitigation Options for Global Warming-Emphasizing CO₂ Sequestration Options. *Journal of Chemical engineering of Japan*, 36 (4), 361-375.

Yousuf, M., Mollah, A., Hess, R., Tsai, Y. & Cocke, D. (1993). An FTIR and XPS investigations of the effects of carbonation on the solidification/stabilization of cement based systems-Portland type V with zinc. *Cement and Concrete Research*, 23(4), 773-784.

Experiencias de aprendizaje en ingeniería industrial usando Lego Mindstorms. Caso de estudio: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Learning experiences in industrial engineering using Lego Mindstorms. Case study: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

IVONNE ANGÉLICA CASTIBLANCO JIMÉNEZ - JOAN PAOLA CRUZ GONZÁLEZ - CARLOS RODRIGO RUIZ CRUZ - LILIANA DEL CARMEN PEDRAZA VEGA - DIANA CATALINA LONDOÑO RESTREPO

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ivonne.castiblanco@escuelaing.edu.co - joan.cruz@escuelaing.edu.co - carlosr.ruiz@escuelaing.edu.co - liliana.pedraza@escuelaing.edu.co - diana.londono@escuelaing.edu.co

Recibido: 01/03/2017 Aceptado: 31/03/2017

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

Resumen

En el presente artículo se analiza el uso de Invention System Kits, en particular Lego Mindstorms Education EV3, en los procesos de enseñanza y aprendizaje en la educación superior. A través de la documentación del proceso de apropiación de la herramienta y mediante la construcción y programación de diferentes modelos, por parte de profesores vinculados a los programas de Ingeniería Industrial e Ingeniería de Sistemas y estudiantes del programa de Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, se identificaron varios niveles de aprendizaje que pueden alcanzarse con el uso de este tipo de herramientas, y se determinaron estrategias de enseñanza para futuras experiencias.

Palabras claves: ludificación, taxonomía, aprendizaje activo, resultados de aprendizaje.

Abstract

This paper introduces an analysis of the use of Invention System Kits, especially Lego Mindstorms Education EV3, among the teaching and learning processes in higher education. By documenting the tool appropriation process while designing and programming different prototypes, industrial and systems engineering teachers and industrial engineering students at Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito identified different learning levels that could be achieved through the use of this kind of tool, thus designing teaching strategies for future experiences.

Keywords: gamification, taxonomy, active learning, learning results.

INTRODUCCIÓN

Lego Mindstorms Education EV3 (en adelante, Lego Mindstorms) surgió de la colaboración entre la compañía Lego Group y el Laboratorio de Medios del MIT (Massachusetts Institute of Technology, MIT Media Lab) (Havergal, 2015), quienes desarrollaron un “ladrillo inteligente” al que se le pudieran dar instrucciones a través de un lenguaje de programación, para imprimir movimiento a los productos que venía construyendo la empresa Lego Group.

Este tipo de herramientas se utiliza para apoyar la enseñanza de conceptos en ciencias, tecnología e ingeniería. La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito no es ajena a esta realidad, razón por la cual a partir del proyecto de investigación de convocatoria interna 2016 “Ludificación de las metodologías de enseñanza en ingeniería a través del uso de Invention System Kits”, se pretende identificar alternativas para el uso de estas herramientas orientadas al desarrollo de competencias en los estudiantes, de tal manera que puedan analizar, diseñar y solucionar problemas del campo de estudio de la ingeniería industrial en forma creativa, aplicando estrategias de pensamiento lógico, analítico y crítico.

LEGO EN LA EDUCACIÓN SUPERIOR

El empleo de Lego Mindstorms como herramienta de soporte en los procesos de enseñanza y aprendizaje es muy extendido. Se han identificado dos enfoques:

- *Desarrollo de competencias genéricas.* El uso de estas herramientas permite desarrollar competencias tales como la capacidad de solución de problemas, capacidad de trabajo en equipo y pensamiento lógico. Para este propósito se utilizan desde figuras y bloques constructivos hasta componentes electrónicos.
- *Desarrollo de competencias específicas.* Este enfoque se utiliza en aquellos programas de estudio que se benefician directamente de herramientas particulares. Tal es el caso del desarrollo de competencias en automatización que son del interés de programas como Ingeniería Industrial, Ingeniería Electrónica e Ingeniería de Sistemas, en los cuales se espera que como resultado del proceso de formación sus graduados sean capaces de implementar y desarrollar sistemas o componentes automatizados.

En cualquiera de los dos enfoques, estas herramientas se pueden emplear en diferentes etapas del proceso formativo, desde los cursos introductorios hasta los avanzados del nivel específico de los programas.

Experiencias del primer enfoque se encuentran en la Universidad de Huddersfield, donde se usa Lego para un curso de historia (Havergal, 2015). Como metodología, se utilizan piezas de Lego como soporte de juegos de rol, en los cuales los estudiantes leen un texto histórico y se les pide que construyan modelos o juegos. Como resultado, se identificó que los estudiantes pueden expresarse mejor sobre lo que leen. Esto ha demostrado que los estudiantes comprenden mejor los temas y desarrollan mayor interés en comparación con la estrategia tradicional de establecer lecturas obligatorias, de las cuales se deben elaborar informes escritos o verbales.

El potencial y el beneficio se reconocen en las instituciones de educación y también en la misma compañía Lego Group, que a través de donaciones busca permanentemente extender el uso de sus productos. Un caso particular es la Universidad de Cambridge, que ha recibido importantes recursos para la puesta en marcha de actividades formativas y proyectos de investigación en metodologías lúdicas en la educación, para mejorar las competencias de expresión oral y escrita, así como de creatividad en diferentes niveles de formación (Morgan, 2015).

En la Universidad Iberoamericana León se está utilizando la metodología Lego Serious Play para construir modelos de emprendimiento en su incubadora de negocios, lo que ha facilitado el desarrollo de competencias de innovación y emprendimiento en sus graduados (Universidad Iberoamericana León, 2015). Un elemento que se considera relevante en este logro es la opción de desarrollar modelos tridimensionales que permiten hacer visible la operación y los resultados, ya que al ser una metodología basada en retos contribuye a identificar y conocer las capacidades de los emprendedores.

En España, profesores de la Universidad de Granada y la Universidad Nacional de Educación a Distancia han desarrollado un conjunto de módulos para enseñar los conceptos de programación a estudiantes de Ciencias e Ingeniería, usando Lego Mindstorms y Arduino; esto con el fin de facilitar el aprendizaje de dichos conceptos (Rubio, Mañoso, Romero & De Madrid, 2014). Los resultados de esta experiencia han demostrado que más estudiantes se sienten motivados y aprenden a progra-

mar y desarrollar productos, ya que la metodología que se ha usado permite reforzar la teoría que se ve en clase con prácticas de laboratorio.

En Chile, en la Universidad de Valparaíso, hay una experiencia similar en el curso de Fundamentos de Programación. La principal motivación para utilizar Lego Mindstorms fue facilitar la asimilación de los conceptos a los estudiantes, para determinar si con el uso de esta herramienta se podía mejorar el aprendizaje y disminuir la tasa de pérdida (Muñoz, Barcelos, Villarroel, Barria, Becerra, Noel & Frango, 2015). Para lograr esto se desarrollaron una serie de talleres digitales con Scratch y Lego Mindstorms NXT. Los resultados preliminares muestran mejoras en la tasa de aprobación, así como en las calificaciones obtenidas por los estudiantes.

En la Universidad del Quindío, en Colombia, se ha usado Lego Mindstorms con los estudiantes de primer semestre del programa de Ingeniería de Sistemas y Computación, con el objetivo de implementar prácticas y laboratorios en diferentes espacios académicos de los programas de ingeniería (Aldana & Buitrago, 2015). Este trabajo se ha realizado durante varios semestres y se ha hecho en las siguientes cinco etapas: 1) se contextualiza a los estudiantes, de tal modo que conozcan un poco de la historia y los principales conceptos asociados; 2) se construye el producto y se ponen en evidencia aspectos relacionados con la solución de problemas y trabajo en equipo; 3) se comprende el funcionamiento del producto a través del entendimiento de su programación; 4) se fortalece lo referente a los conceptos de programación a través de diferentes programas; 5) se participa en una competencia de productos aplicando todo lo aprendido.

Los principales resultados de este proyecto están orientados al desarrollo de habilidades como trabajo en equipo, competencias comunicativas, desarrollo de la creatividad y pensamiento lógico deductivo, las cuales son necesarias para estudiantes de ingeniería.

EXPERIENCIAS DEL USO DE LEGO MINDSTORMS EN INGENIERÍA INDUSTRIAL EN LA ESCUELA

La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, por medio del proyecto mencionado, busca caracterizar las competencias adquiridas por estudiantes del programa de Ingeniería Industrial mediante el uso de metodologías de aprendizaje activo. La metodología del

proyecto consistió en la construcción de tres productos: un seleccionador de piezas de colores (*color sorter*), un brazo robótico (*picker*) y una línea de ensamble de trompos (*spinner factory*) (figura 1).

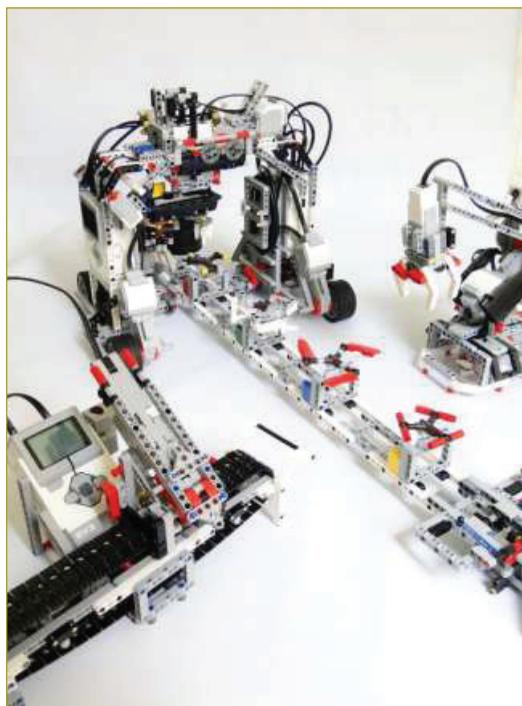


Figura 1. Productos desarrollados para el proyecto (Foto: Elaboración propia).

La construcción de los productos estuvo a cargo de un equipo de profesores de los programas de Ingeniería Industrial e Ingeniería de Sistemas, así como de estudiantes del programa de Ingeniería Industrial vinculados al Semillero de Investigación en Producción de la Escuela. La construcción se dividió en dos etapas. La primera consistió en el ensamble físico de los componentes del producto, y la segunda, en la programación del comportamiento a través del uso del *software* Lego Mindstorms.

En cada una de estas etapas se identificaron diferentes resultados de aprendizaje, los cuales se entienden como aquello que se espera que un estudiante conozca, comprenda o sea capaz de demostrar después de terminar un proceso de aprendizaje (González & Wagenaar, 2006).

En cuanto a los resultados en el plano psicomotor, el cual considera las destrezas físicas y de coordinación,

se utilizó la versión ajustada de la taxonomía propuesta por Dave (1970) que considera cinco niveles: imitación, manipulación, precisión, articulación y naturalización (tabla 1).

Tabla 1
Niveles psicomotores (Dave, 1970)

Niveles de aprendizaje	Concepto
1. Imitación	Observa el comportamiento y lo imita.
2. Manipulación	Habilidad de llevar a cabo ciertas acciones siguiendo instrucciones y practicando destrezas.
3. Precisión	Lleva a cabo una tarea cometiendo aún errores pequeños; también adquiere mayor precisión en ausencia de la fuente original.
4. Articulación	Coordina una serie de acciones combinando dos o más destrezas. Se pueden modificar los modelos para ciertos requerimientos o solucionar un problema.
5. Naturalización	Despliega un nivel avanzado de actuación en forma natural. Las destrezas se combinan, tienen una secuencia y se llevan a cabo con facilidad y en forma coherente.

Teniendo en cuenta esta taxonomía, algunos de los resultados de aprendizaje identificados en el proyecto son:

- Reproduce un producto a partir de las instrucciones dadas.
- Modifica los productos a partir de las posibles mejoras encontradas, ya sea en la construcción o en el funcionamiento.
- Construye diferentes productos a partir de las herramientas y materiales disponibles y un objetivo dado.

Para establecer los resultados en el plano cognitivo, es decir, relacionados con los procesos de pensamiento, se tomó como base la taxonomía de Bloom revisada (Anderson et al., 2005), la cual considera seis niveles: recordar, comprender, aplicar, analizar, evaluar y crear (tabla 2). Esta taxonomía permite definir el nivel de complejidad esperado o logrado en un proceso de formación y es una de las metodologías de clasificación más utilizadas en el mundo.

Tabla 2
Taxonomía de Bloom revisada (Anderson et al., 2005)

Categoría	Descripción
Recordar	Reconocer y traer a la memoria información relevante de la memoria a largo plazo.
Comprender	Habilidad de construir significado a partir de material educativo, como la lectura o las explicaciones del docente.
Aplicar	Aplicación de un proceso aprendido, ya sea en una situación familiar o en una nueva.
Analizar	Descomponer el conocimiento en sus partes y pensar en cómo éstas se relacionan con su estructura global.
Evaluar	Ubicada en la cúspide de la taxonomía original de 1956, evaluar es el quinto proceso en la edición revisada. Consta de comprobación y crítica.
Crear	Nuevo en esta taxonomía. Involucra reunir cosas y hacer algo nuevo. Para llevar a cabo tareas creadoras, los aprendices generan, planifican y producen.

De acuerdo con lo anterior, algunos de los resultados de aprendizaje para esta fase del proyecto son:

- Identifica componentes del kit a partir de la funcionalidad de cada uno.
- Aplica el conocimiento adquirido en la construcción de un producto, a la construcción de otros.
- Desarrolla pensamiento creativo y espíritu de investigación, con el fin de lograr el funcionamiento de los productos, haciendo uso de las herramientas disponibles.
- Toma decisiones para mejorar la construcción y funcionamiento de los productos con base en aprendizajes y experiencias previas.
- Trabaja en forma colaborativa para lograr el objetivo de construir y poner en funcionamiento un producto nuevo.

Construcción y programación de los productos

La primera aproximación contundente al uso del sistema fue la construcción de un seleccionador, un sistema de clasificación de productos por colores. El desarrollo tanto de su montaje como de su programación permitió una adaptación progresiva al *software*, pues es un sistema

que requiere el uso de lógica para el entendimiento de la secuencia de movimiento del equipo.

En principio, fue necesario el reconocimiento de bloques de acción que permitieran movimientos básicos de los motores, y bloques de flujo que adaptaran esos movimientos a cadenas lógicas, con el empleo de bucles e interruptores que permiten la creación de procesos cíclicos y de decisión, este último enfocado en la elección de los productos de acuerdo con el color.

El uso de este tipo de bloques reafirmó conocimientos previos de programación básica y fomentó la utilización de métodos y lógica, necesarios en la comprensión de un flujo de proceso. Por otro lado, el empleo posterior de sensores y bloques de operación requirió investigación y profundización en el tema.

La utilización de los sensores permitió, de manera práctica y por lo tanto más clara para un estudiante, una introducción al uso de variables y su cambio a partir de modificaciones en el ambiente, mientras que los bloques de operación cuantifican esas variables y por medio de relaciones matemáticas sencillas logran el movimiento o un cambio visible en la estructura, siendo éste el resultado final que esperan los estudiantes, generando recordación y, por lo tanto, retención del conocimiento que se requirió para obtenerlo.

Paralelo al desarrollo del seleccionador, se construyó un brazo robótico con una programación similar y el uso de las mismas herramientas para la programación, pero en este caso utilizadas en otro contexto y con un conocimiento previo gracias al seleccionador. Esta construcción permitió reforzar los conocimientos adquiridos, pero con un poco más de libertad, dando el espacio para proponer ideas y mejoras al sistema inicial.

También se elaboró una línea de ensamble de trompos, para lo cual hubo que revisar algunos conceptos con los que un ingeniero industrial no está necesariamente familiarizado, como las compuertas lógicas para el uso de transferencia y validación de datos reportados por los sensores, siendo éste un conocimiento que no se profundiza en el transcurso de la carrera pero que es bastante sencillo de aprender y retener mediante ayudas didácticas, dado que al mismo tiempo que se investigaba sobre éstas, se podía ver en acción su uso práctico en una fábrica y así convertir el conocimiento práctico en un conocimiento tácito y después pasarlo a un conocimiento explícito mediante la ayuda de protocolos y manuales.

LECCIONES APRENDIDAS DEL USO DE LEGO MINDSTORMS EN INGENIERÍA INDUSTRIAL EN LA ESCUELA

Partiendo del objetivo del proyecto que propone utilizar metodologías de aprendizaje activo para generar competencias tecnológicas en los estudiantes, al ejecutar la metodología del proyecto, se evidenciaron en los estudiantes los siguientes estilos de aprendizaje:

Aprendizaje por descubrimiento

Según esta teoría, desarrollada por Bruner y Goodman (1947), los estudiantes aprenden por medio de la exploración o descubrimiento, de tal modo que en vez de que el profesor entregue todas las explicaciones, sea el estudiante quien, motivado por su curiosidad, observe, compare y analice para que por su propia cuenta desarrolle un proceso cognitivo que permita comprender el asunto en estudio.

En el caso de la experiencia en la construcción de los productos, hubo que hacer un trabajo de búsqueda de información adicional por parte de los estudiantes para resolver las inquietudes, analizar opciones y avanzar en el objetivo propuesto.

Aprendizaje colaborativo

En un proceso de aprendizaje colaborativo, las partes se comprometen a aprender algo juntos. Lo que debe aprenderse sólo puede conseguirse si el trabajo del grupo se hace en colaboración. Es el grupo el que decide cómo realizar la tarea, qué procedimientos adoptar, cómo dividir el trabajo y las tareas que se deben llevar a cabo. La comunicación y la negociación son claves en este proceso (Zañartu, s.f.).

Durante el desarrollo del proyecto se vio reflejado este aprendizaje a medida que los estudiantes construían los productos en pequeños equipos con sus respectivas tareas, cuyos resultados debían compartirse entre equipos, habilitando así procesos de comunicación en los que se intercambian experiencias, se desarrollan habilidades, se observa y reflexiona, para encontrar alguna solución tanto en materia de construcción de los productos como en la programación de éstos.

Aprendizaje basado en problemas

Es una metodología en la que se investiga, interpreta, argumenta y propone la solución de uno o varios problemas, creando un escenario simulado de posible solución y analizando las probables consecuencias (Pimienta, 2012).

Durante la ejecución de la metodología, si bien los estudiantes contaban con herramientas y tutoriales básicos, fue necesario investigar y proponer soluciones alternativas para lograr un mejor funcionamiento de los productos. Mejoraron su capacidad de búsqueda, análisis de información y diseño de soluciones.

Aprendizaje experiencial

En este modelo se supone que para aprender algo se debe trabajar o procesar la información que se recibe. Según esto, podemos partir de una experiencia directa y concreta, o bien de una experiencia abstracta, similar a la que se tiene cuando se lee acerca de algo o cuando alguien lo relata. Así, las experiencias que se tienen, concretas o abstractas, se transforman en conocimiento cuando se elaboran de alguna de estas dos maneras: ya sea reflexionando y pensando sobre ellas, o bien experimentando activamente con la información recibida (Gutiérrez, Romero & Solórzano, 2011).

En el presente proyecto, a partir de la construcción de los productos, se pudo reflexionar y construir conocimiento desde la experiencia. Esto favorece que los estudiantes no sólo sigan instrucciones, sino que piensen sobre lo que hacen, y así, introduzcan variaciones y mejoras.

Aprendizaje basado en proyectos

Es una metodología que plantea la inmersión del estudiante en una situación o un problema real que requiere solución o comprobación. Dentro de los pasos se incluyen recopilación, análisis e interpretación de información, redacción de conclusiones, y presentación de resultados (Pimienta, 2012).

Dentro de los resultados encontrados se puede afirmar que esta estrategia se evidencia en el aprendizaje de los estudiantes, porque a partir de un objetivo propuesto por el profesor simulan físicamente la construcción de un nuevo producto industrial.

CONCLUSIONES

Como resultado de la ejecución de este proyecto se puede concluir, al igual que en las otras investigaciones mencionadas, que Lego Mindstorms y su inclusión como herramienta educativa contribuye al desarrollo de habilidades como creatividad, innovación, comunicación y colaboración, resolución de problemas y manejo de tecnología. También se evidenció que los estudiantes que participaron en el semillero de investigación mejoraron su capacidad de análisis de problemas y diseño de soluciones en forma estructurada.

Los estudiantes del semillero de investigación evidenciaron los niveles psicomotores de Dave (1970), dado que reprodujeron productos a partir de las instrucciones dadas, modificaron los modelos a partir de las posibles mejoras encontradas, y construyeron diferentes productos a partir de las herramientas y materiales disponibles y un objetivo dado.

Igualmente, se evidenciaron los niveles propuestos en la taxonomía de Bloom revisada (Anderson et al., 2005) al identificar componentes del kit desde la funcionalidad de cada uno, aplicar el conocimiento adquirido a la construcción de otros, desarrollar pensamiento creativo y espíritu de investigación, tomar decisiones para mejorar la construcción y funcionamiento de los productos con base en aprendizajes y experiencias previas, y trabajar en forma colaborativa para lograr el objetivo de construir y poner en funcionamiento productos nuevos.

Finalmente, se observaron los estilos de aprendizaje por descubrimiento, colaborativo, basado en problemas, experiencial y basado en proyectos, lo cual es un resultado positivo que complementa las metodologías de enseñanza en ingeniería industrial, además de ser un resultado adicional en la educación superior en el campo del diseño y la tecnología.

De manera más específica, se puede afirmar que la adecuación del seleccionador de piezas de colores y del brazo robótico impulsó la creatividad, el trabajo en equipo, la investigación y la motivación por aprender en los estudiantes. Adicionalmente, la construcción de la línea de ensamble fue un desafío que permitió desarrollar la competencia de resolución de problemas, dado que se requirió el remplazo de piezas y la modificación de la línea, con creatividad e ingeniería aplicada, para así poder hacer que ésta funcionara adecuadamente, cumpliendo los parámetros previstos.

A modo de reflexión, durante el proceso se pudo evidenciar que cada individuo tiene diferentes procesos de aprendizaje cognitivos y de interacción con el sistema, que se manifiestan en las preferencias de trabajo individual versus grupal, entre otras. Otro aspecto que hay que rescatar es la influencia directa que tiene en el ánimo, la productividad de todo el grupo y el logro de los resultados requeridos, la manera en la cual cada persona actúa o se relaciona para cumplir una labor específica.

En el futuro, existe la oportunidad de profundizar cómo el uso de herramientas como Lego Mindstorms puede favorecer diferentes estilos de aprendizaje, según el modelo de Kolb (1984). Por ejemplo, explorar el aprendizaje en diferentes tipos de estudiantes: 1) activos, quienes aprenden manipulando objetos y trabajando con otros; 2) reflexivos, quienes aprenden analizando y trabajando de manera individual; 3) teórica o conceptual, orientada hacia las teorías; 4) pragmática, es decir, concretos, prácticos y orientados a los hechos y procedimientos.

Agradecimientos

Especial agradecimiento a los estudiantes que se han vinculado voluntariamente al Semillero de Investigación en Producción para trabajar en este proyecto, por su ardua labor y compromiso:

Juan Sebastián Cadena Muñoz. Estudiante de Ingeniería Industrial. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

Miguel Ángel Barragán Cantor. Estudiante de Ingeniería Industrial. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

Carlos Mauricio Urrego. Estudiante de Ingeniería Industrial. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.

REFERENCIAS

- Aldana, M. & Buitrago, J. (2015). Experiencias de enseñanza y aprendizaje Lego® Mindstorms para estudiantes de primer semestre en el programa de Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad del Quindío. Recuperado de <http://www.acofipapers.org/index.php/eiei2015/2015/paper/viewFile/1118/395>.
- Anderson, L.W., Krathwohl, D., Airasian, P., Cruikshank, K.A., Mayer, R.E., Pintrich, P., Raths, J. & Wittrock, M.C. (2005). A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives. *Educational Horizons*, 83 (3), [p. 154-p.159].
- Bruner, J. S. & Goodman, C. C. (1947). Value and need as organizing factors in perception. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 42, 33-44.
- Dave, R. H. (1970). Developing and writing behavioural objectives. *Educational Innovators Press*.
- Gonzalez, J. & Wagenaar, R. (2006). Una introducción a Tuning Educational Structures in Europe. Recuperado de http://www.unideusto.org/tuningeu/images/stories/documents/General_Brochure_Spanish_version.pdf.
- Gutiérrez, M., Romero M. & Solórzano, M. (2011). El aprendizaje experiencial como metodología docente: aplicación del método Macbeth. Recuperado de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-16372011000100006.
- Haverгал, C. (2015). Lego: the building blocks of university teaching? Recuperado de <https://www.timeshighereducation.com/news/lego-the-building-blocks-of-university-teaching>.
- Kolb, D. (1984). *Experiential learning experiences as the source of learning development*. Nueva York: Prentice Hall.
- Morgan, J. (2015). Cambridge Lego professor and research centre: price tag £4m. Recuperado de <https://www.timeshighereducation.com/news/cambridge-lego-professor-and-research-centre-price-tag-ps4m>.
- Muñoz, R., Barcelos, T., Villarroel, R., Barria, M., Becerra, C., Noel, R. & Frango, I. (2015). Actas de las XXI Jornadas de la Enseñanza Universitaria de la Informática. Uso de Scratch y Lego Mindstorms como apoyo a la docencia en fundamentos de programación. Recuperado de http://bioinfo.uib.es/~joemiro/aenui/procJenui/Jen2015/mu_usod.pdf.
- Pimienta, J. (2012). *Estrategias de enseñanza-aprendizaje. Docencia universitaria basada en competencias*. México: Pearson.
- Rubio, M., Mañoso, C., Romero, R. & De Madrid, A. (2014). Actas de las XX Jenui. Uso de las plataformas Lego y Arduino en la enseñanza de la programación, 419-426. Recuperado de http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/15503/P419ru_usod.pdf.
- Universidad Iberoamericana de León (2015). Promueven ventajas de Incubar con metodología Lego. Recuperado de <http://www.leon.uia.mx/noticias/articulo.cfm?liga=lego-ibero>.
- Zañartu, L.M. (s.f.). Aprendizaje colaborativo: una nueva forma de diálogo interpersonal y en red. Recuperado de http://www.colombiaaprende.edu.co/html/productos/1685/articles-301446_destacado.pdf.

Diseño y desarrollo de productos en Colombia más allá del aula. Una propuesta para su caracterización

Design and development of products in Colombia beyond the classroom. A proposal for its characterization

CARLOS ANDRÉS PÉREZ TRISTANCHO
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

carlos.perez@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/03/2017 Aceptado: 10/04/2017
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

El objetivo de este artículo es presentar detalladamente una propuesta de instrumento para recolección de información que permita contextualizar y caracterizar la práctica del diseño y desarrollo de productos en la industria colombiana para que, a partir de la información recopilada, se puedan adoptar al currículo de ingeniería los elementos relevantes encontrados, en pro del mejoramiento de la calidad de la educación en este campo del conocimiento. La metodología seguida, que incluye la revisión documental y la experiencia práctica y académica del autor, ha conducido al diseño del instrumento, definiendo 65 ítems dentro de 5 categorías de evaluación, pasando posteriormente a ser validado por parte de expertos y aplicado como prueba piloto en algunos departamentos de ingeniería de empresas manufactureras representativas de la industria colombiana. Los resultados preliminares, además de validar y complementar la propuesta, han permitido evidenciar algunas brechas entre la enseñanza del diseño en ingeniería y su práctica, y lo que potencia a este instrumento como una importante fuente de información no sólo para la academia sino también para la industria, una vez que sea aplicado de manera amplia.

Palabras claves: diseño en ingeniería, diseño en la industria, enseñanza del diseño, metodologías de diseño.

Abstract

This article aims to present in detail a proposal for gathering information that allows to contextualize and characterize the practice of design and product development in Colombian industry, so that from the information collected the relevant elements found can be integrated into engineering curricula, for improving the quality of education in this field of knowledge. The methodology, which includes the literature review and the practical and academic experience of the author, led to the design of the instrument, defining 65 items within 5 categories of evaluation. It was then validated by experts and applied as a pilot test in some departments of engineering at outstanding manufacturing companies of the Colombian industry. The preliminary results, besides validating and complementing the proposal, revealed some gaps between the teaching of engineering design and its practice, which makes this instrument an important source of information not only for academia but also for industry, once it is widely applied.

Keywords: engineering design, design in industry, teaching of design, design methodologies.

INTRODUCCIÓN

En la educación superior, en especial en ingeniería, debe existir una conexión entre ciencia, tecnología y sociedad (Misas, 2004); es decir, que lo que se enseña y aprende se debe corresponder con lo que se aplica en la práctica, para que efectivamente la educación pueda convertirse en un motor de desarrollo para el país (Cárdenas et al., 2015). El caso específico de la enseñanza del diseño en ingeniería no resulta ajeno a esta realidad e indiscutiblemente debe corresponderse con su práctica en el plano industrial, condición que incluso ha llegado a generar propuestas de programas académicos específicos de diseño de ingeniería en la industria en algunos países (Dunn-Rankin et al., 2013). En el contexto colombiano, pese a reconocer la necesidad de acercamiento entre universidad y empresa, han hecho falta esfuerzos para lograr lo correspondiente al implementar estrategias de enseñanza-aprendizaje basadas en la práctica del diseño y desarrollo de productos dentro de las empresas, que en cualquier caso demandará salir del aula, explorar y conocer la manera como se hace el diseño en la práctica profesional. A lo largo del artículo se describe la propuesta citada en Pérez et al. (2015) acerca de la caracterización del proceso de diseño y desarrollo de productos en la industria colombiana, la cual considera aspectos generales y organizacionales de los departamentos de I+D, recursos intelectuales y físicos de apoyo empleados en la práctica, las disciplinas y su participación en las actividades del proceso, las habilidades y competencias requeridas en los profesionales y la documentación técnica asociada.

METODOLOGÍA

A partir de la revisión teórica y la experiencia en la práctica y enseñanza del diseño en ingeniería por parte del autor, se ha diseñado una encuesta para recolección de información tendiente a caracterizar de manera exploratoria-descriptiva el proceso de diseño y desarrollo de productos en Colombia, de acuerdo con Pérez et al. (2015) y acogiendo las recomendaciones encontradas en Medina (2014) para su elaboración.

Una vez diseñada la encuesta, se presentó a expertos para su validación y se realizó una aplicación piloto en una muestra de cuatro empresas que poseen formalmente un departamento de I+D, las cuales incluyen dentro de sus procesos el diseño y desarrollo de pro-

ductos; lo anterior con el fin de evaluar la pertinencia de los ítems y su claridad durante la aplicación.

PROPUESTA DE ENCUESTA PARA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

El instrumento denominado Encuesta Empresarial-Departamentos de I+D, originalmente constituido por 65 ítems distribuidos en cinco categorías de evaluación, tuvo modificaciones durante la validación y aplicación piloto en el número de ítems y las posibilidades de respuesta para éstos. Finalmente, presenta la siguiente configuración para cada categoría:

Categoría 1

Características generales del departamento de I+D. Su composición se puede apreciar en la tabla 1.

Categoría 2

Recursos de apoyo al diseño y desarrollo de productos. Su composición se aprecia en la tabla 2.

Categoría 3

Disciplinas y su participación en el departamento de I+D. Su composición se puede apreciar en la tabla 3.

Categoría 4

Habilidades y competencias requeridas en los profesionales que se desempeñan en los departamentos de I+D, sugeridas por Zambrano et al. (2005), según los criterios del Consejo de Acreditación para la Ingeniería y la Tecnología en Estados Unidos (ABET). Su composición se aprecia en la tabla 4.

Categoría 5

Documentación técnica generada en el departamento de I+D, como resultado de los procesos de diseño y desarrollo de productos. Su composición se puede apreciar en la tabla 5.

Tabla 1
Características generales del departamento de I+D

DE ACUERDO CON LAS CARACTERÍSTICAS DEL DEPARTAMENTO DE I+D DE SU EMPRESA, MARQUE CON UNA X DEBAJO DE LAS OPCIONES CORRESPONDIENTES					
CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL DEPARTAMENTO DE I+D	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
El Sistema de Gestión Integral de la empresa se encuentra compuesto por:	ISO 9001	ISO 14000	OHSAS 18000	ISO 27000	ISO TS16949
Otros	ISO 17025				
La jefatura del departamento de I+D le reporta directamente al:	Gerente general	Gerente o subgerente técnico	Jefe de Producción	Vicép. de Tecnología y Operaciones	Ingeniero de Proyectos
En el departamento de I+D se emplean procedimientos para:	Diseño de producto	Diseño de proceso	Definición de requisitos de diseño	Selección de los integrantes del proyecto	Proyectos de innovación
Los nuevos proyectos de I+D nacen a partir de:	Estudios de mercado	Solicitud directa del cliente	Propuestas internas de I+D	Tratados de transferencia de tecnología	Propuestas de proyectos por entidades asociadas
La filosofía de diseño, se direcciona hacia:	La manufactura y el ensamble	Las pruebas	El servicio	El medio ambiente	Otro
La determinación de los requisitos de diseño y desarrollo se apoyan en la herramienta:	QFD	Los 5W+2H	Metodología 8D	Formato propio	No emplea
En el departamento de I+D se emplean formatos para seguimiento a las etapas de:	Revisión	Verificación	Validación	Registro del conocimiento	Otro

Tabla 2
Recursos de apoyo al diseño y desarrollo de productos

DE ACUERDO CON LOS RECURSOS EXISTENTES EN LOS QUE SE APOYA EN SU EMPRESA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS, MARQUE CON UNA X DEBAJO DE LAS OPCIONES CORRESPONDIENTES					
RECURSOS DE APOYO AL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Los ensayos destructivos con que se cuenta son:	Tensión	Fatiga	Dureza	Metalografía	Espectrometría
Los ensayos no destructivos con que se cuenta son:	Partículas magnéticas	Corrientes de Eddy	Tintas penetrantes	Ultrasonido	Rayos X
Las herramientas metrológicas con que se cuenta son:	Patrones y verificadores	Sistemas de medición analógica	Sistemas de medición digital	Proyector de perfiles	Equipo de coordenadas tridimensionales
La inspección de calidad es realizada por:	Metrólogos	Inspectores sin certificación	Inspectores nivel I	Inspectores nivel II	Inspectores nivel III
Las herramientas CAD/CAM/CAE empleadas son:	SolidWorks	Inventor	Catia	Ansys	Scanner 3D
Otros	Matlab	LabView	Mathcad	SolidEdge	NX-CAM
Otros	Adobe Illustrator	Moldflow	Indesign	Photoshop	Aveva
Otros	Master CAM	Software propio diseño			
Los procesos convencionales de manufactura con que se cuenta son:	Fundición	Mecanizado y troquelado	Soldadura		Tratamientos superficiales y térmicos
Otros	Corte plasma				
Los procesos avanzados de manufactura con que se cuenta son:	CNC	Grabado o corte láser	Electroerosión	Corte por chorro	Prototipado rápido
Los utillajes y verificadores empleados en manufactura provienen de:	Adaptación de existentes	Desarrollo total propio	Desarrollo local regional	Desarrollo local nacional	Desarrollo extranjero
Las herramientas informáticas que apoyan los proyectos de I+D son:	Office	Project	Synergy (gestor documental)	e-mail (gestor documental)	BAAN
Otros	ERP	Software propio	Smart Sheet		

Tabla 3
Disciplinas y su participación en el departamento de I+D

DE ACUERDO CON LAS DISCIPLINAS EXISTENTES EN EL DEPARTAMENTO DE I+D DE SU EMPRESA, ESCRIBA DEBAJO DE CADA OPCIÓN EL NÚMERO DE PROFESIONALES SEGÚN CORRESPONDA					
DISCIPLINAS Y SU PARTICIPACIÓN EN EL DEPARTAMENTO DE I+D	Totales de la disciplina	Desempeño en diseño de producto	Desempeño en diseño de proceso	Desempeño en la elaboración de presupuestos	Desempeño en formulación, evaluación y seguimiento de proyectos
Ingeniería Industrial					
Ingeniería Eléctrica					
Ingeniería Mecánica					
Ingeniería Electrónica					
Ingeniería Electromecánica					
Ingeniería Mecatrónica					
Ingeniería Química					
Ingeniería Metalúrgica					
Ingeniería de Sistemas					
Dibujo Técnico					
Diseño Industrial					
Contaduría					
Economía					
Administración					
Otra profesión (¿cuál?) - Publicidad					
Otra profesión (¿cuál?) - Diseño Gráfico					
Otra profesión (¿cuál?) - Arquitectura Naval					
Otra profesión (¿cuál?) - Ingeniería Civil					
Otra profesión (¿cuál?) - Tecnólogos					

Tabla 4
Habilidades y competencias requeridas en los profesionales de I+D

DE ACUERDO CON LAS HABILIDADES Y COMPETENCIAS REQUERIDAS EN LOS PROFESIONALES QUE INGRESAN A LABORAR EN EL DEPARTAMENTO DE I+D DE SU EMPRESA, MARQUE CON UNA X EL NIVEL DE IMPORTANCIA DE CADA UNA DE ÉSTAS SEGÚN CORRESPONDA 1 = baja; 2 = media-baja; 3 = media; 4 = media-alta; 5 = alta					
HABILIDADES Y COMPETENCIAS	1	2	3	4	5
Aplicar conocimientos de matemáticas, ciencias e ingeniería					
Diseñar y conducir experimentos e interpretar datos					
Diseñar sistemas, componentes o procesos para satisfacer necesidades definidas					
Trabajar en equipos multidisciplinarios					
Identificar, formular y resolver problemas de ingeniería					
Poseer responsabilidad profesional y ética					
Comunicarse efectivamente de forma oral, escrita y en otros idiomas					
Poseer habilidades para el aprendizaje continuo					
Poseer habilidades para usar técnicas y herramientas modernas de ingeniería					
Otra (¿cuál?)					

Tabla 5
Habilidades y competencias requeridas en los profesionales de I+D

DE ACUERDO CON EL TIPO DE DOCUMENTACIÓN TÉCNICA QUE SE GENERA EN EL DEPARTAMENTO DE I+D DE SU EMPRESA COMO RESULTADO DE LOS PROCESOS DE DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS, MARQUE CON UNA X LA OPCIÓN SEGÚN CORRESPONDA A SU EXISTENCIA			
DOCUMENTO TÉCNICO	SÍ	DOCUMENTO TÉCNICO	SÍ
Especificaciones técnicas de materiales		Planos	
Informes de seguimiento de los proyectos		Memorias de cálculo	
Formatos de aspectos e impactos ambientales asociados al producto		Gamas o rutas de fabricación	
Formatos de identificación de riesgos y peligros asociados al producto		Planes de control de proceso	
Estudios previos y formulación de proyectos de inversión		Instructivos operacionales	
Formulación de proyectos llave en mano		Estándares de fabricación	
Informes de selección y evaluación de proveedores		Presupuestos de fabricación	
Formulación y seguimiento a planes de mejora		Fichas técnicas de equipos	
Manuales de partes, operación y mantenimiento		Informes de laboratorio	
Documentación asociada a Lean Manufacturing (5'S, JIT, TPM, etc.)		Protocolos de pruebas	
Procedimientos de ensamble e instalación		Otro (¿cuál?)	

RESULTADOS DE PRUEBA PILOTO

En la tabla siguiente se presentan los ítems que hasta el momento resultan destacados como resultado de la aplicación piloto del instrumento de recolección de información (tabla 6).

CONCLUSIONES

A partir de la validación por parte de expertos y de los resultados de la prueba piloto aplicada, se pudo evi-

denciar que la Encuesta Empresarial-Departamentos de I+D es una herramienta clara, coherente y fácil de entender por parte del encuestado, que además permite recopilar la información requerida para tener una descripción detallada de los elementos que componen la práctica del diseño y desarrollo de productos en el plano industrial.

La encuesta puede y debe aplicarse en empresas industriales que posean dentro de sus departamentos de I+D el proceso de diseño y desarrollo de productos,

Tabla 6
Caracterización preliminar del diseño en departamentos de I+D en la industria colombiana

CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	ÍTEM DESTACADO
Generalidades del diseño y desarrollo de productos	Sistemas de gestión	ISO 9000
	Líder de departamento	Gerente general
	Etapas estandarizadas	Diseño de producto
	Etapas reguladas	Validación
	Origen de productos	Solicitud del cliente
	Filosofía de diseño	DFMA
	Herramientas para definición de requisitos de diseño	Uso de formato propio
	Software para seguimiento	Project
Recursos de apoyo	Ensayos	Dureza - Tintas
	Recursos de metrología	Patrones y verificadores
	Software CAD/CAM/CAE	Ansys
	Procesos de manufactura	CNC
Disciplinas y su participación	Entre 17 diferentes y en diversas etapas	Ingeniería mecánica
Habilidades y competencias	Entre 9 diferentes	Trabajo interdisciplinar
Documentos técnicos asociados	Entre 21 diferentes	Planos

y los datos que se obtengan al aplicarla facilitarán no sólo la caracterización de los departamentos de I+D, sino que además aportarán al desarrollo de mejores prácticas de enseñanza-aprendizaje que permitan a los ingenieros en formación responder a las demandas del entorno más allá del aula.

El aparte destinado en la encuesta para observaciones emergentes durante su aplicación ha permitido plasmar importantes recomendaciones de los jefes de departamento de I+D acerca de aspectos no considerados en los ítems, como el énfasis que recomiendan hacer en innovación durante la formación de los ingenieros y la necesidad de enseñanza de algunos procesos de fabricación no convencionales requeridos para el desempeño profesional, específicamente en el procesamiento de espumas poliméricas rígidas y flexibles.

REFERENCIAS

- Misas, G. (2004). *La educación superior en Colombia. Análisis y estrategias para su desarrollo* (2016). Bogotá, D.C.: Editorial Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 13 de noviembre de 2016 de http://www.colombiaaprende.edu.co/html/investigadores/1609/articulos-73081_archivo.pdf.
- Cárdenas, N. & Pérez, C. (2015). Las metodologías de la enseñanza en diseño como motor de desarrollo. Memorias del Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería Acofi. Disponible en <http://www.acofipapers.org/index.php/eiei2015/2015/paper/view/1174/407>.
- Dunn-Rankin, D., Bobrow, J., Mease, K. & McCarthy, J. (1998). Engineering Design in Industry: Teaching Students and Faculty to Apply Engineering Science in Design. *Journal of Engineering Education*, 87(3), 219-222. doi:10.1002/j.2168-9830.1998.tb00345.x.
- Pérez, C. & Cárdenas, N. (2015). Buenas prácticas de diseño en los departamentos de I+D en la industria. Memorias del Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería Acofi. Disponible en <http://www.acofipapers.org/index.php/eiei2015/2015/paper/viewFile/1403/509>.
- Medina, M. (2014). *La investigación aplicada a proyectos* (1.^a ed.). Vol. II. De los objetivos al diseño metodológico de la investigación. Bogotá: Centro de Investigaciones para el Desarrollo Cayé SAS.
- Zambrano, J., Velásquez, R. & Sáenz, F. (2005). Tendencias de la educación en ingeniería. *Revista Avances*, 2, 4-16. Consultado el 21 de enero de 2015 en <http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances-2/articulo1.pdf>.

Estudio de la fisuración por contracción plástica en losas de concreto con agregados reciclados y uso de microfibras

Study of fissuration for plastic contraction in concrete plates with recycled aggregates and microfiber use

DENNIS ALEXÁNDER COLLAZOS BOLAÑOS¹ - NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Ingeniero civil. Estudiante de maestría en la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Posgrado en Ingeniería Civil, énfasis en Estructuras.

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

Recibido: 15/03/2017 Aceptado: 17/04/2017

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

Resumen

La contracción plástica del concreto a causa de la rápida evaporación del agua en estado fresco puede generar fisuras que afectan la estética, funcionalidad, resistencia y durabilidad de elementos de concreto, en particular de aquellos que tienen una gran superficie expuesta y un volumen relativamente bajo como losas de pavimentos o pisos; esta fisuración y la posterior reparación generan costos económicos y ambientales adicionales.

Uno de los factores que más inciden en la fisuración por contracción plástica es la velocidad del viento, porque promueve altas tasas de evaporación del agua en la superficie del concreto. Se hizo un estudio para determinar el porcentaje óptimo de microfibra de nailon para el control de la fisuración por contracción plástica en losas de concreto, usando agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición en diferentes porcentajes de remplazo del agregado grueso. Se elaboraron losas de 100 x 60 cm, con espesor de 8 cm y relación agua-cemento 0,50. Estas losas fueron sometidas a velocidades de viento de 8, 18 y 30 km/h, con medición de temperatura y humedad relativa en el laboratorio.

Palabras claves: contracción plástica, túnel de viento, control de fisuración.

Abstract

Plastic contraction of concrete, due to quick water evaporation in fresh state, can generate fissures affecting aesthetics, functionality, resistance, and durability of concrete elements, especially those which have a large exposed surface and a relatively small volume such as pavement plates or floors; this fissuration and eventual repair generate additional economic and environmental costs.

One of the factors that play a bigger role in fissuration for plastic contraction is wind speed, because it fosters high water evaporation rates on the concrete's surface. A study was performed to determine the optimal percentage of nylon microfiber to control fissuration for plastic contraction in concrete plates was performed, using recycled aggregates from construction and demolition waste at different ratios replacing coarse aggregates. 100 cm x 60 cm x 8 cm plates were built with a water-cement ratio of 0.50. These plates were exposed to 8, 18, and 30 km/h, measuring temperature and relative humidity in the lab.

Keywords: plastic contraction, wind tunnel, fissuration control.

INTRODUCCIÓN

El uso de agregados reciclados para la producción de concreto se ha convertido en un tema de vital importancia para la industria de la construcción a escala mundial. La continua explotación de canteras y la extracción de materiales conllevan al agotamiento de recursos naturales, lo que hace de la construcción una industria no muy amable con el medio ambiente y el desarrollo sostenible. Por esto, países como España, Alemania, Reino Unido, Australia, Bélgica, Japón y Estados Unidos han dado una gran relevancia al empleo de agregados reciclados en la construcción, desarrollando distintas normativas para estandarizar la utilización de agregados reciclados en el concreto.

El aumento en el uso de agregados reciclados para mezclas de concreto contribuye al desarrollo sostenible del sector de la construcción, generando actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición, en aras de reducir los impactos ambientales originados por el gran volumen de residuos o escombros provenientes de dicha actividad.

En Estados Unidos, la Asociación Federal de Carreteras recicla los pavimentos de concreto. En 1985, durante la ampliación de 7.000 carreteras en Wyoming, el agregado fue una mezcla de materiales naturales y reciclados, con lo que se ahorró el 16 % del costo total del proyecto. Estas experiencias generan expectativas en el uso de agregados reciclados para concreto de pavimentos y losas, las cuales son estructuras con una alta relación superficie/volumen, que pueden tener una notoria contracción por secado y generar una alta fisuración, aunado a las altas velocidades de viento que se pueden presentar en áreas no pobladas [1].

Por lo tanto, es importante evaluar el comportamiento de las losas de concreto con agregados reciclados, con respecto a su fisuración para garantizar un comportamiento adecuado y de gran durabilidad.

Lo anterior motivó el desarrollo de este proyecto, que tuvo como objetivo estudiar la fisuración de losas de concreto con agregados reciclados, expuestas a diferentes velocidades de viento y el uso de microfibras para control de la fisuración durante la contracción plástica del concreto. Los resultados obtenidos aportarán un referente más para la utilización de concretos con agregados reciclados, con el objetivo de incentivar su uso, aliviar la carga de escombros generados por la

construcción y demolición, contribuyendo a una construcción sostenible al reducir los impactos ambientales.

FISURACIÓN POR CONTRACCIÓN PLÁSTICA

La fisuración por contracción plástica se produce cuando los cambios de volumen del concreto se ven limitados por los agregados, refuerzo, o por el contacto con otra superficie; estos cambios de volumen generan tensiones internas en la pasta, causando fisuras cuando se sobrepasa la resistencia a la tracción del concreto. La formación de fisuras es más pronunciada en las primeras horas, cuando la resistencia del concreto es todavía muy baja; adicionalmente, pequeñas fisuras ocasionadas por efectos de carga y ambientales pueden iniciar la formación de fisuras más profundas [2].

La contracción es la causa fundamental de fisuras y es inducida por la pérdida de agua del concreto; se presume generalmente que el agrietamiento por contracción plástica se desarrolla cuando la tasa de evaporación supera la velocidad a la que el agua de exudación sube a la superficie. Cuando la tasa de evaporación de la superficie del concreto es mayor de $1,0 \text{ kg/m}^2/\text{h}$, hay una alta probabilidad de formación de grietas debido a contracción plástica ACI 305.R [3].

Para las condiciones de evaporación dadas, es evidente que las mezclas con mayor contenido de pasta tienen una mayor tendencia a agrietarse, y el uso de agregados reciclados que ya tienen pasta incluida agrava esta situación. Del mismo modo, se ha demostrado que la formación de grietas por contracción plástica es influenciada por el enrasado y las operaciones de acabado, en tanto que la mayoría de las grietas formadas son paralelas a la dirección enrasado [4]. Adicionalmente, la pérdida de agua en la superficie del concreto también se ve influenciada por la velocidad del viento, que promueve altas tasas de evaporación.

La pérdida de agua en la superficie del concreto se ve influenciada por la velocidad del viento, la cual promueve altas tasas de evaporación; además, el uso de agregados reciclados en el concreto induce a la contracción debido a la gran capacidad de estos agregados para absorber una gran cantidad de agua.

Se define como exudación al fenómeno de migración del agua del concreto, que aflora en la superficie de acabado. Con ella hay un aumento de la relación a/C en la región de la superficie de la placa, perjudicando la

integridad superficial del concreto. El periodo en que la exudación ocurre es suficientemente claro, el cual se caracteriza por la presencia de una película de agua que confiere un brillo superficial, iniciándose después de las operaciones de terminación y se prolongan hasta el inicio del fraguado del concreto, cuando el gran aumento de la superficie específica, ocasionado por el crecimiento de los cristales de la hidratación del cemento, disminuye la permeabilidad de la pasta de cemento. El comportamiento de las fibras de polipropileno en el control de la exudación, sea para reducirla o para disminuir la velocidad en que ocurre, puede explicarse como la capacidad que tiene la fibra de retener el agua en el interior del concreto [5].

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Se llevó a cabo un programa experimental en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, para evaluar la influencia que tiene la velocidad del viento en la tasa de evaporación en losas de concreto con agregados reciclados (ACR), así como la influencia de la adición de microfibras de nailon para el control de la fisuración.

El programa empieza con el diseño, construcción y puesta en funcionamiento de un túnel de viento, diseñado con la colaboración de personal profesional del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

El diseño del túnel se hizo buscando la simulación de corrientes de viento en flujo laminar, de tal modo que el viento cubra toda la superficie expuesta de la losa en evaluación. Para esto se empleó una turbina (ventilador) de 71 cm (28 pulgadas) de diámetro, que con un variador de velocidad genera viento con velocidades desde 0 hasta 50 km/h, viento que es dirigido a través de un tronco de cono que hace las veces de transición entre una sección circular y una sección rectangular del túnel y con una longitud horizontal de 70 cm. Para asegurar un flujo uniforme del viento sobre las losas de concreto, el túnel se diseñó con una sección transversal rectangular de 67 cm de ancho por 37 cm de altura y una longitud de 3,30 m, con lo cual se tiene una longitud total del túnel de 4,00 m, desde el punto de ubicación de la turbina hasta la salida del túnel.

El túnel de viento tiene una ventana superior y una ventana lateral en el tramo donde se ubica la losa, las

cuales permiten observar el estado de la superficie de la losa durante el tiempo de fraguado de la mezcla. El tramo de túnel donde se ubica la losa posee una abertura inferior de las dimensiones de la formaleta metálica (100 x 60 x 8 cm), con una tolerancia de 1,0 cm, con el fin de permitir el ingreso de la formaleta con la mezcla de concreto para someterla al flujo de aire a la velocidad de ensayo (figura 1). Para el ingreso de la losa al túnel se diseñó y se fabricó una mesa móvil, la cual está provista de cuatro ruedas que permiten el desplazamiento de la mesa en cualquier dirección; así mismo, cuenta con dos gatos de tornillo que facilitan el desplazamiento vertical (sube y baja) de la mesa, lo que permite ingresar y retirar la losa del túnel (figura 2).



Figura 1. Vista general del túnel de viento.



Figura 2. Mesa móvil para ingreso de losa al túnel.

El túnel de viento está provisto de equipos de instrumentación para el monitoreo y medición de datos, tales como el variador de velocidad para definir la frecuencia de giro de la turbina y así establecer una velocidad del viento, termocuplas para medición de temperatura y humedad relativa del aire en el interior del túnel, así como termocuplas que permiten medir la temperatura dentro de la mezcla. La mesa móvil en su superficie está dotada con tres celdas de carga, las cua-

les permiten medir con una precisión de miligramos el peso de la losa con su formaleta. Estas variables fueron monitoreadas a través de termopares conectados a un computador para registrar los datos, con mediciones tomadas cada diez segundos.

En el programa experimental se fundieron en total 72 muestras, losas de dimensiones 100 x 60 x 8 cm, con el fin de generar una superficie geométrica con relación área - volumen típica en losas de concreto. Se utilizó concreto con la inclusión de tres porcentajes de agregados de concreto reciclado (ACR): 0, 50 y 100 %. Se realizaron ensayos exponiendo las losas a velocidades de viento de 8, 18 y 30 km/h, utilizando para ello el túnel de viento. La inclusión de agregados de concreto reciclado tiene alguna influencia sobre la retracción total, ya que el objetivo de esta investigación no es cuantificar la contracción total de las losas de concreto, sino evaluar la fisuración en las losas de concreto con agregados reciclados por influencia de la velocidad del viento, la tasa de evaporación de agua y la influencia en el concreto del uso de microfibras de nailon.

También se incluye en este trabajo el estudio de la fisuración de losas con formaletas con restricción lateral, a la cual se le restringen los bordes mediante la fijación de ganchos de acero de 5 mm de diámetro a lo largo del perímetro del molde de acero (figura 3).



Figura 3. Formaleta metálica con ganchos laterales para restricción.

Para evitar la absorción o pérdida de agua, se utilizaron formaletas fabricadas en lámina de acero de 3 mm de espesor. De esta manera, el movimiento de agua libre en las placas puede ocurrir sólo hacia arriba, sin ninguna absorción de agua por la formaleta usada.

Las mezclas de concreto se prepararon de acuerdo con las proporciones de la mezcla presentadas en la tabla siguiente (tabla 1).

Las fibras se añadieron en tres fracciones de volumen diferentes: 1) 0,0018 %; 2) 0,0022 %; y 3) 0,0028

%. Se utilizó una microfibra de nailon Fiberstrand N (Toxement), que es una microfibra monofilamento de nailon para reforzamiento de concreto, especialmente diseñada para ayudar a mitigar la formación de contracción plástica en el concreto.

Tabla 1
Proporciones de mezclas en volumen utilizadas

Material	Volumen para mezcla (m ³ /m ³)		
	0 % ACR	50 % ACR	100 % ACR
Cemento	0,1299	0,1299	0,1299
Aire	0,02	0,02	0,02
Agua	0,2	0,2	0,2
Grava	0,340	0,163	0,353
Concreto reciclado	0	0,192	0,297
Arena	0,310	0,300	0,1299

La fibra utilizada, Fiberstrand N, cumple con la norma ASTM C-1116: Especificación estándar para concreto y concreto lanzado reforzado con fibra.

- Material: nailon monofilamento
- Gravedad específica: 1,16
- Punto de fusión: 260 °C (500 °F)
- Conductividad eléctrica: baja
- Absorción de agua a 20 °C: despreciable
- Longitud de fibra: ¾" (13 mm)
- Resistencia química a los ácidos y álcalis: excelente

El agregado fino corresponde a arena natural y un cemento Pórtland tipo III Cemex estructural. Los concretos se mezclaron a partir de las dosificaciones de los diferentes materiales y se vertieron en secuencia: agregado fino, agregado grueso, agua y cemento; en el caso de adición de fibra, las fibras sintéticas se vertieron inmediatamente después de que el concreto estaba mezclado y se mezcló durante tres minutos adicionales cuando se agregó la fibra. Luego de mezclar, la consistencia del concreto se midió con el ensayo de asentamiento. La mezcla de concreto se transportó en carretilla desde el patio de agregados hasta el laboratorio donde se ubicó el túnel de viento, a una distancia de 200 m, aproximadamente; después el concreto se colocó en la formaleta, se niveló y se enrasó. Las losas fueron niveladas manualmente y enrasadas en la dirección transversal, empleando cerca de 20 minutos en la operación de nivelación o enrase para mezclas con una adecuada manejabilidad.

Las losas se expusieron a las condiciones ambientales que se presentaron en el interior del laboratorio, es decir, la temperatura y humedad del aire del ambiente y velocidad del viento programada en el túnel de viento. La temperatura se midió durante todo el tiempo de ensayo (cinco horas) y para efectos de análisis de resultados se tomó el promedio de la temperatura, al igual que la humedad relativa. Cinco horas corresponde al tiempo de fraguado del cemento utilizado para las mezclas del programa experimental.

Las condiciones ambientales se midieron cerca de la salida del túnel, a una altura de 100 mm desde la parte superior de la muestra. Para la temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento se tomaron medidas cada diez segundos por espacio de cinco horas, tiempo de duración del ensayo.

La tasa de evaporación se calculó con los datos arrojados por las celdas de carga, que permiten medir el peso inicial de la mezcla de concreto y su descenso a lo largo del tiempo de ensayo. Esta diferencia de peso se divide entre el área de la superficie expuesta al viento de la losa (1,00 x 0,60 m) y entre el número de horas de exposición (5 horas), para obtener una tasa de evaporación en $\text{kg}/\text{m}^2/\text{hora}$. Cabe destacar que la variación del peso no es lineal, ya que puede medirse cada 30 minutos y así obtener una curva de pérdida de peso en el concreto; sin embargo, para esta investigación se tomaron un peso inicial y un peso final y se obtuvo una variación lineal.

Después de cinco horas de ensayo, la losa se retiró del túnel de viento y se examinó minuciosamente para trazar un esquema de fisuración, se midieron anchos y longitudes de fisuras y se determinó un porcentaje de área fisurada para cada losa.



Figura 4. Aspecto de una losa con esquema de fisuración después del tiempo de ensayo.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se puede observar que el asentamiento de la mezcla 1 (0 % ACR) sin adición de microfibras alcanzó un valor promedio de 6,5 cm, con lo cual se comprueba que cumple con el diseño de mezcla planteado para una relación $a/C=0,50$. Para la mezcla 2, con 50 % ACR, se obtuvo una disminución en el asentamiento del 26 % con respecto a la mezcla con 0 % ACR. Esta variación en el asentamiento indica una alta pérdida de agua en la pasta, lo que genera una alta probabilidad de contracción por secado, así como de fisuración (figura 5).

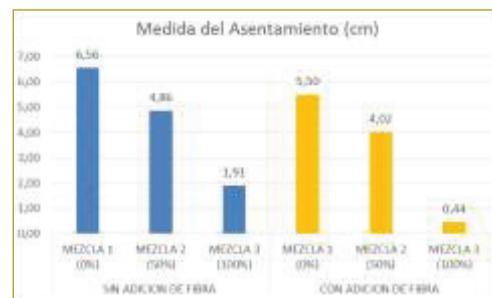


Figura 5. Variación de la medida del asentamiento de acuerdo con el replazo de ACR en las mezclas 1, 2 y 3, sin adición y con adición de microfibras.

En la tabla siguiente se resumen los resultados de la prueba experimental realizada para evaluar la influencia de la velocidad del viento en la tasa de evaporación de agua, según el contenido de agregados de concreto reciclado (ACR), con restricción o sin ella, temperatura y humedad relativa promedio durante el tiempo de ensayo (tabla 2).

Igualmente, se observa que la tasa de evaporación se incrementa con el aumento de la velocidad del viento y que hay una ligera disminución en la tasa de evaporación con el incremento del porcentaje de agregado de concreto reciclado, atribuible a la alta absorción del agregado reciclado. Las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire se muestran variables durante el tiempo de ensayo, pero para efectos de evaluación de la evaporación se tomó el promedio de las temperaturas registradas durante el tiempo de ensayo. Datos del peso del concreto muestran la disminución con el incremento del porcentaje de agregado de concreto reciclado (ACR).

Tabla 2

Resumen de resultados de ensayos de losas sin adición de microfibras. Promedios de dos muestras para cada variable

VARIABLES			TASA DE EVAPORACION Kg/m ² h	T°C PROMEDIO	HR% PROMEDIO	T°C PROMEDIO MEZCLA	PESO DEL CONCRETO kg	
SIN FIBRA	AGREGADO NATURAL	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,46	23	49	11	100
			18 Km/h	0,58	22	49	12	103
			30 Km/h	0,72	19	47	13	101
		CON RESTRICCION	8 Km/h	0,39	20	53	11	102
			18 Km/h	0,53	24	44	12	99
			30 Km/h	0,67	21	50	11	100
	50% RAC	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,41	21	50	10	99
			18 Km/h	0,55	25	37	10	97
			30 Km/h	0,69	20	47	11	100
		CON RESTRICCION	8 Km/h	0,48	23	40	10	98
			18 Km/h	0,64	19	58	11	97
			30 Km/h	0,77	23	43	11	99
100% RAC	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,37	22	39	9	98	
		18 Km/h	0,52	10	27	5	99	
		30 Km/h	0,66	20	56	12	95	
	CON RESTRICCION	8 Km/h	0,48	22	52	11	98	
		18 Km/h	0,63	22	46	11	94	
		30 Km/h	0,86	21	52	11	99	

Tabla 3

Resumen de resultados de ensayos de losas con adición de microfibras. Promedios de dos muestras para cada variable

VARIABLES			TASA DE EVAPORACION Kg/m ² h	T°C PROMEDIO	HR% PROMEDIO	T°C PROMEDIO MEZCLA	PESO DEL CONCRETO kg	
CON FIBRA	AGREGADO NATURAL	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,38	9	27	5	107
			18 Km/h	0,41	21	47	10	107
			30 Km/h	0,44	19	58	13	106
		CON RESTRICCION	8 Km/h	0,17	19	57	11	105
			18 Km/h	0,55	20	45	11	104
			30 Km/h	0,66	18	57	11	102
	50% RAC	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,34	19	51	12	100
			18 Km/h	0,39	15	58	11	101
			30 Km/h	0,42	22	45	11	107
		CON RESTRICCION	8 Km/h	0,28	20	53	11	104
			18 Km/h	0,53	21	47	11	105
			30 Km/h	0,56	18	59	12	102
100% RAC	SIN RESTRICCION	8 Km/h	0,34	19	53	10	97	
		18 Km/h	0,38	17	59	11	99	
		30 Km/h	0,43	21	40	11	95	
	CON RESTRICCION	8 Km/h	0,32	17	58	12	94	
		18 Km/h	0,48	19	56	10	96	
		30 Km/h	0,55	20	52	11	99	

En la tabla anterior (tabla 3) se presentan los resultados de la prueba experimental realizada para evaluar la influencia de la velocidad del viento en la tasa de evaporación de agua en mezclas con adición de microfibras de nailon, según el contenido de agregados de concreto reciclado (ACR), con restricción o sin ella, temperatura y humedad relativa promedio durante el tiempo de ensayo.

Así mismo, puede apreciarse la influencia de la adición de microfibras. Comparando valores de las tablas 2 y 3, se observa que la tasa de evaporación para muestras sin adición de microfibras y sometidas a una velocidad del viento de 8 km/h oscila entre 0,37 y 0,46 kg/m²/hora, mientras que para losas con mezclas con adición de microfibras y sometidas a la misma velocidad oscila entre 0,34 y 0,38 kg/m²/hora, mostrando una disminución en la tasa de evaporación del 13 %, aproximadamente.

Partiendo de los resultados promedios indicados en las tablas 2 y 3, se elaboró la gráfica de la figura siguiente

(figura 6), en la que se muestra claramente la tendencia de la tasa de evaporación de agua dependiendo de la velocidad del viento y del contenido de ACR en la mezcla. La tasa de evaporación de agua se incrementa directamente con el aumento de la velocidad del viento para mezclas con el mismo contenido de % ACR, mientras que con el incremento del contenido de % ACR en la mezcla de concreto, la tasa de evaporación tiende a disminuir por efecto del alto porcentaje de absorción que tiene el agregado de concreto reciclado.

Se presentan ahora, los resultados obtenidos para la tasa de evaporación en función de la velocidad del viento para diferentes contenidos de ACR, con el fin de analizar la incidencia que tiene la adición de microfibras en la evaporación en este tipo de mezclas (figura 7).



Figura 6. Gráfico de tasa de evaporación para losas con mezclas a diferentes velocidades de viento, diversos contenidos de % ACR y relación A/C=0,5.

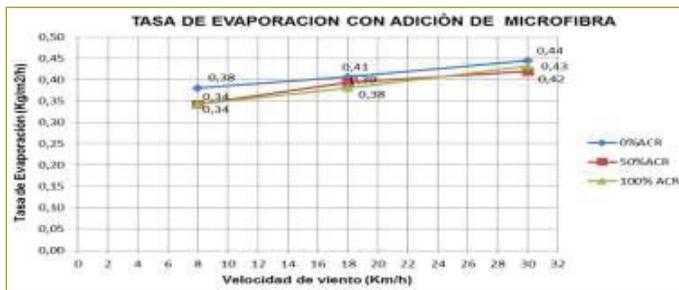


Figura 7. Gráfico de tendencia de la tasa de evaporación en función de la velocidad del viento para diferentes contenidos de ACR, en mezclas con adición de microfibra.

Los resultados encontrados para la tasa de evaporación en mezclas con adición de microfibra muestran, evidentemente, una notoria reducción en estos valores con respecto a las mezclas sin adición de microfibra.

A continuación se presentan los valores obtenidos para la tasa de evaporación en mezclas sin adición de microfibra y con adición de microfibra, con lo que se pretende facilitar la comparación de resultados y observar la incidencia del uso de microfibras en la tasa de evaporación en losas que tienen diferente contenido de ACR (tabla 4).

Tabla 4

Comparativo de los valores de la tasa de evaporación de agua en mezclas sin adición de microfibra

Mezcla	Tasa de evaporación de agua en kg/m²/h					
	Sin adición de fibra			Con adición de fibra		
	8 km/h	18 km/h	30 km/h	8 km/h	18 km/h	30 km/h
0 % ACR	0,46	0,58	0,72	0,38	0,34	0,34
50 % ACR	0,41	0,55	0,69	0,34	0,39	0,42
100 % ACR	0,37	0,52	0,66	0,34	0,38	0,43

Los valores presentados con anterioridad permiten evidenciar que la inclusión de microfibras en las mezclas de concreto reduce notoriamente la tasa de evaporación, por su contribución a disminuir la exudación del concreto.



Figura 8. Gráfico comparativo de la tasa de evaporación en mezclas sin adición de microfibra y con adición de microfibra.

GRADO DE FISURACIÓN

La fisuración o el agrietamiento es el efecto más visible e indeseable, como consecuencia de la contracción del concreto en su estado plástico durante el tiempo de secado. Generalmente, se supone que el agrietamiento por contracción plástica se desarrolla cuando la tasa de evaporación supera la velocidad a la que el agua de exudación se presenta en la superficie [2].

Tomando en cuenta que los agregados de concreto reciclado (ACR) se caracterizan por tener una alta absorción, dicha condición cuenta en el rápido secamiento de la pasta, lo que puede contribuir a la formación de fisuras o grietas en la superficie del concreto. Tal situación conduce a la realización de este estudio, en el que se pretende evaluar el grado de fisuración en losas de concreto con inclusión de diferentes porcentajes de ACR.

En la página siguiente se muestra la tendencia del área fisurada en la losa en función de la velocidad del viento y del contenido de agregado reciclado (figura 9).

El porcentaje de área fisurada crece notoriamente con el incremento del ACR, y tiene un ligero aumento cuando se incrementa la velocidad del viento, en losas con diferentes contenidos de ACR. A continuación se puede apreciar que la variación del porcentaje de área fisurada en el sentido vertical es mayor que la variación en el sentido horizontal, lo que indica que hay una mayor

incidencia en la fisuración por el contenido de ACR que por la velocidad del viento (figura 9).

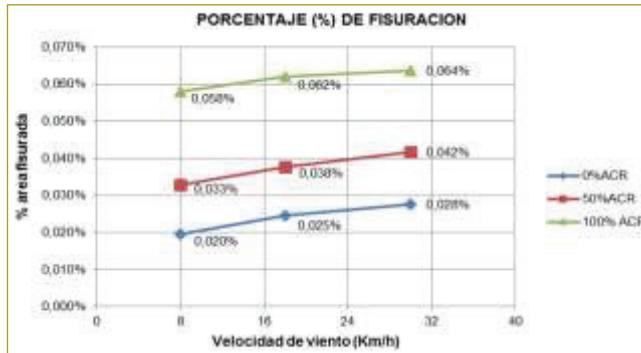


Figura 9. Gráfico de valores del porcentaje de área fisurada en losas a diferentes velocidades de viento y diversos contenidos de ACR, sin adición de fibra y relación a/C=0,5.

Con respecto a la restricción ante la contracción, se pudo evidenciar que el área fisurada aumenta en esta condición, en relación con la losa en formaleta sin restricción. La combinación de retracción y restricción desarrolla tensiones de tracción dentro del concreto, que aparte de la baja resistencia a la tracción inherente al concreto, se genera la fisuración (figura 10) [6].

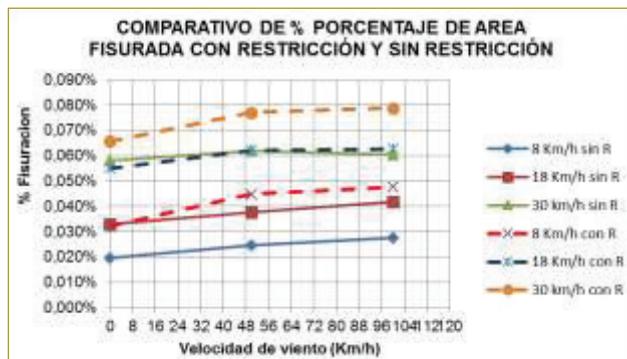


Figura 10. Gráfico comparativo de la tendencia del porcentaje de área fisurada con restricción y sin restricción.

La adición de microfibras en el concreto contribuye a la reducción de la tasa de evaporación, cuyo efecto beneficioso también se puede evidenciar en la disminución de la fisuración. Para determinar el comportamiento de las mezclas con la adición de microfibra, se realizaron varios ensayos en los cuales se fue incrementando el porcentaje de microfibra hasta encontrar el porcentaje óptimo, de tal manera que la fisuración fuera cero (0 %).

Después de varios ensayos se logró establecer el porcentaje óptimo de adición de microfibra para 0 % de área fisurada, así:

Tabla 5

Contenidos de microfibra de nailon para reducción de área fisurada 0 %

Contenido ACR	8 km/h	18 km/h	30 km/h
0 % ACR	0,0020 %	0,0023 %	0,0023 %
50 % ACR	0,0026 %	0,0027 %	0,0027 %
100 % ACR	0,0028 %	0,0028 %	0,0028 %

A renglón seguido se observan los resultados de los ensayos realizados para determinar el porcentaje de adición de microfibra requerido para control del área fisurada, en losas con diferente contenido de agregado reciclado y a diversa velocidad del viento (figura 11).



Figura 11. Gráfico de valores de porcentaje óptimo de fibra para control de fisuración en mezclas con diferente contenido de ACR, diversa velocidad del viento y relación a/C=0,5.

Esto para mezclas de concreto que formaron parte del programa experimental y con relación A/C=0,5.

También se hicieron pruebas de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, y se hallaron resultados acordes con otras investigaciones, en las cuales la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad se reducen con el incremento del agregado reciclado. La adición de microfibras contribuye al incremento de la resistencia a la compresión y del módulo elástico.

CONCLUSIONES

- La tasa de evaporación en losas de concreto se incrementa directamente con el aumento en la velocidad del viento, debido principalmente a la exudación del

concreto, con lo cual el agua sube a la superficie y se evapora rápidamente por acción del viento.

- De acuerdo con los resultados obtenidos en mezclas con ACR, la velocidad del viento tiene una mayor incidencia en la tasa de evaporación que la absorción de los agregados de concreto reciclado.
- En losas con alto contenido de agregado de concreto reciclado (% ACR), la tasa de evaporación de agua tiende a una ligera disminución en relación con el concreto con agregado natural, debido posiblemente a la incidencia que tiene el porcentaje de absorción de los agregados de concreto reciclado.
- Para losas con mezclas con mayor contenido de % ACR, la tasa de evaporación tiende a una ligera disminución, mientras que el porcentaje de área fisurada aumenta considerablemente, debido al incremento del % ACR.
- Los resultados de la evaluación de área fisurada muestran un mayor incremento con el aumento en el contenido de agregado de concreto reciclado que con el incremento de la velocidad del viento.
- Los resultados experimentales han demostrado que la adición de microfibras de nailon a la mezcla de concreto fue más eficiente para restringir consi-

derablemente la formación de fisuras debido a la contracción plástica.

REFERENCIAS

- [1] Natalani, M.B., Klees, D.R. & Tirner (2000).
- [2] Shaeles, C.A. & Hover, K.C. (s.f.). Influence of mix proportions and construction operations on plastic shrinkage cracking in thin slabs. *ACI Mater J*.
- [3] ACI Committee 305 (1991). *Hot weather concreting* (ACI 305.R-91). American Concrete Institute, Farmington Hills, 20 pp.
- [4] Kraai, P.P. (1985). A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete. *Concr Construct*, 30(9):775-8.
- [5] Rodríguez & Montardo, 2002. Como se cita en el documento La influencia de fibras sintéticas en las propiedades de hormigones frescos, de la revista *Ingeniería de Construcción* (20, abril de 2015). Ruiz Sibaja, A., López Ríos, J. & Martínez Jiménez, J.
- [6] Comité ACI 224 (2001). *Control de la fisuración en estructuras de concreto*. American Concrete Institute.
- [7] Soroushian, P., Mirza, F. & Alhozaimy, A. (1995). Plastic shrinkage cracking of polypropylene fiber reinforced concrete. *ACI Mater J*, 92(5):553-560.
- [8] Naaman, A.E., Wongtanakitcharoen. T. & Hauser, G. (2005). Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete. *ACI Mater J*, 102(1):49-58.
- [9] Gluzhge, P.J. (1946). El trabajo del Instituto Científico de Investigación c. *Gidrotekhnicheskoye Stroitel'stvo*, 4:27-28 [en ruso].
- [10] Nixon, P.J. (1976). *Reciclado agregado del hormigón es un hormigón*. Una revisión. 37-DRC comité, pp. 317-318.

La Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura: análisis y recomendaciones para su operación

Regional Port Authority of Buenaventura: Analysis and suggestions for its management

YADIRA PÉREZ ARCINIEGAS¹ - CARLOS ORAMAS LEURO²

1. Magíster en ingeniería civil.

2. Ingeniero naval. Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

yadiraperezarciniegas@gmail.com

Recibido: 17/03/2017 Aceptado: 20/04/2017

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

Resumen

En este artículo se presentan indicadores de rendimiento para las principales operaciones de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura (en adelante, SPRBUN) y se proponen unas recomendaciones que buscan mejorar las condiciones generales de operación, establecer requerimientos operativos, reglamentaciones y políticas, junto con propuestas de control y supervisión que contribuyan en la reducción de tiempos; igualmente, se proponen obras y mejoras en infraestructura que ayuden a la reducción de tiempos en la cadena logística.

Tanto los indicadores como las recomendaciones se estructuraron con base en las variables más representativas que inciden en la capacidad portuaria. Para el análisis de la relación entre las variables y proceder a estructurar dichos indicadores se consideraron varias metodologías para finalmente seleccionar el análisis estructural, por ser una herramienta diseñada para relacionar variables según la dependencia e influencia entre éstas, destacando las que son esenciales para la evolución del sistema, analizando ciertos aspectos que algunas veces son poco intuitivos. Se presenta una referenciación con puertos muy similares al de Buenaventura, en la que se comparan los resultados obtenidos para los indicadores, cuya formulación se realizó tomando como referencia los principales indicadores de rendimiento y eficiencia portuaria definidos por la Unctad, la Cepal, el Banco Mundial, Nathan Associates Inc., la Superintendencia de Puertos y Transporte y los que actualmente están contenidos en el contrato de la concesión portuaria de la SPRBUN.

Palabras claves: Buenaventura, puerto, variables, indicadores, recomendaciones.

Abstract

In this article we present performance indicators for the main operations of the Regional Port Authority of Buenaventura (henceforth SPRBUN) and recommendations to improve the general operating conditions, establish operating requirements, regulations, and policies, along with control and monitoring proposals that contribute to the reduction of time, works and infrastructure improvements that contribute to the reduction of time in the supply chain are also advised. Both indicators and recommendations were structured based on the most representative variables that affect port capacity. To analyze the relationship between variables and proceed to structure these indicators, several methodologies were considered to select structural analysis, as a tool designed to relate variables according to their dependence and influence among them, emphasizing those that are essential for the system's evolution, analyzing certain aspects that are sometimes unintuitive.

Referencing ports similar to that of Buenaventura had their results compared regarding the indicators, whose formulation was made with reference to the key performance indicators and port efficiency defined by Unctad, Eclac, World Bank, Nathan Associates Inc., the Superintendence of Ports and Transport, and those currently contained in the contract of the port concession of SPRBUN.

Keywords: Buenaventura, port, variables, indicators, recommendations.

INTRODUCCIÓN

El puerto de Buenaventura es el más importante del Pacífico y de Colombia debido al volumen de carga que moviliza (recibe alrededor del 52 % de la carga que ingresa al país¹), y es uno de los puertos del continente más cercanos al mercado asiático, lo que lo hace tener un interés particular para los tratados de libre comercio firmados y los que se encuentran en proceso; cuenta con varios concesionarios portuarios, entre ellos la SPRBUN, que recientemente cumplió 20 años de haber recibido la concesión para administrar este terminal marítimo.

Dentro de su plan de modernización, la SPRBUN ha invertido más de US\$252 millones de un total de US\$450 millones previstos durante el tiempo de concesión², lo que ha permitido que recientemente se inauguren equipos y obras que buscan aumentar su capacidad y disminuir los tiempos de operación de los buques en puerto, a partir de una atención de cargue y descargue más ágil. Estas inversiones buscan mejorar la competitividad del puerto frente a la ampliación del canal de Panamá, que actualmente presenta un avance cercano al 90 % y que a la terminación de todas las obras, prevista para diciembre de 2015, duplicará su capacidad al añadir un tercer carril de tránsito. Así las cosas, además de las inversiones que viene haciendo la SPRBUN, se busca mejorar los procesos y reducir tiempos para volver aún más eficiente la operación del puerto.

Por lo anterior, se hizo una investigación en busca de las variables que influyen en la capacidad del puerto y a partir de ellas se establecieron unos indicadores para volver más eficiente y por consiguiente más competitiva a la SPRBUN frente al reto que impone la ampliación del canal de Panamá y a la constante evolución y mejoramiento de los demás puertos de la región.

Se hace un mayor aporte al enfocar la investigación hacia la carga de graneles sólidos limpios (que tiene como principal componente la carga agroalimentaria) y

la carga general, que carecen de niveles de cumplimiento, a pesar de tener un impacto directo en la canasta familiar y de ser parte de los productos más movilizadas en el puerto.

En la renegociación del contrato de concesión portuaria de la SPRBUN, que se suscribió en el año 2008, se incluyeron indicadores de productividad diseñados sólo para servicio de carga contenedorizada; además, las operaciones con graneles presentan una desventaja en cuanto a recursos frente a sus similares, como minerales y petróleo, los que al aportar mayores ingresos y mayor tributación a la nación tienen concentrada la atención de las exportaciones y poseen una mejor infraestructura de transporte; así mismo, los graneles sólidos son transportados por modos carretero o férreo, los cuales, después del modo aéreo, son los más costosos, mientras que los hidrocarburos y combustibles son conducidos desde los sitios de explotación y refinación por tuberías de conducción especializadas.

Para analizar las variables que inciden en la operación portuaria y proceder a estructurar los indicadores y recomendaciones, se consideraron varias metodologías para finalmente seleccionar el análisis estructural por ser una herramienta diseñada para relacionar variables según la dependencia e influencia entre éstas, destacando las que son esenciales para la evolución del sistema, analizando ciertos aspectos que algunas veces son poco intuitivos. El análisis estructural es una herramienta de estructuración de una reflexión colectiva, ofrece la posibilidad de describir un sistema con ayuda de una matriz que relaciona todos sus elementos constitutivos y tiene por objetivo hacer aparecer las principales variables influyentes y dependientes, que son las variables sensibles a la evolución del sistema (Godet, 2001).

Gracias al análisis estructural se identificaron las variables más representativas que inciden en la capacidad portuaria; con las variables altamente dependientes o variables salida del sistema, se formularon los indicadores de rendimiento para las principales operaciones portuarias que se llevan a cabo en las instalaciones de la SPRBUN, mientras que con base en las variables determinantes, que presentan mayor poder de influencia y por tanto requieren mayor atención para su pronta solución, se propusieron unas recomendaciones para mejorar las condiciones generales de operación, así como establecer requerimientos operativos, reglamentaciones y políticas, junto con propuestas de control y supervisión

1. *Revista de Logística* [en línea]. Buenaventura, Cartagena, Santa Marta y Barranquilla, los puertos claves del comercio exterior colombiano [fecha de consulta: 24 de marzo de 2014]. Disponible en <<http://www.revistadelogistica.com/Buenaventura-Cartagena-Santa-Marta-y-Barranquilla-los-puertos-claves-del-comercio-exterior-colombiano.asp>>.
2. *Ibid.*

que contribuyan a reducir tiempos; adicionalmente, se propusieron obras y mejoras en infraestructura para optimizar los tiempos en la cadena logística.

RESULTADOS

Indicadores propuestos para el rendimiento de las principales operaciones portuarias

El sistema de indicadores es una herramienta de medición y seguimiento operacional que ayuda a las entidades gubernamentales en su trabajo de supervisión y definición de políticas en la búsqueda continua de mejores niveles de eficiencia. Para impulsar el subsector portuario y optimizar el servicio de transferencia de carga, al igual que su alineación con los intereses de la nación, se considera necesario poner en práctica las recomendaciones formuladas más adelante, estructuradas con base en las variables altamente influyentes en la capacidad portuaria de la SPRBUN.

Para la implementación de este sistema de indicadores se deben llevar a cabo, a corto plazo, las siguientes actividades:

- Dar capacitación para estandarizar la medición de información necesaria para alimentar el sistema de indicadores.
- Diseñar y ejecutar sistemas para el manejo de la información.
- Hacer seguimiento y control de los indicadores.
- Motivar y fomentar la iniciativa privada hacia la calidad del servicio y la competitividad.

El sistema debe contar con la información necesaria para que sea sostenible y evaluado para su mejora continua, permitiendo mayor eficiencia en la medición de problemas que aún persistan a mediano plazo.

A continuación se muestran los indicadores primarios considerados de interés general, pertinentes y oportunos para la toma de decisiones en concordancia con el análisis estructural, al tiempo que se muestran indicadores secundarios que apoyan o complementan el indicador primario; un comportamiento atípico del indicador primario es efecto de un comportamiento atípico del indicador secundario (figura 1).

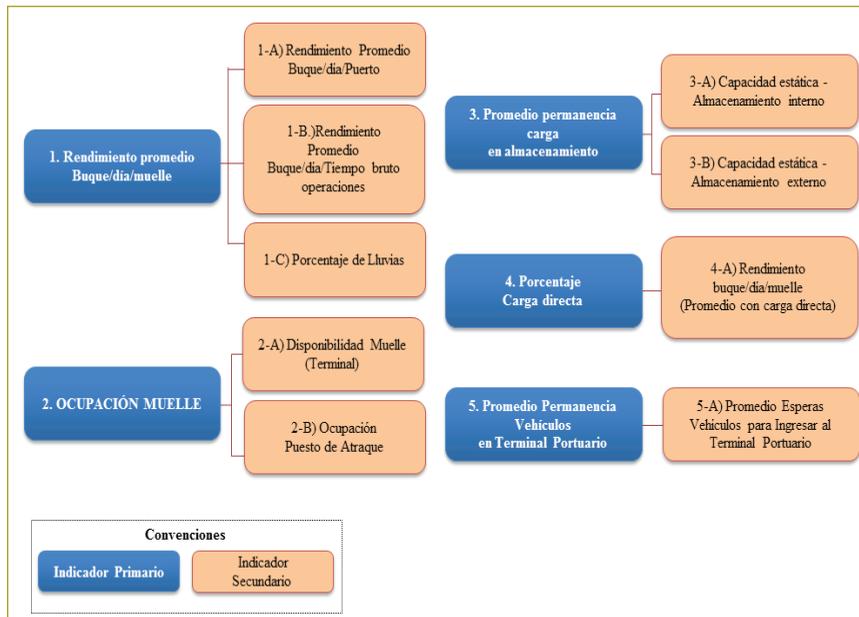


Figura 1. Indicadores propuestos para el rendimiento de las principales operaciones portuarias.

Descripción de los indicadores

INDICADOR PRIMARIO 1	
NOMBRE	Rendimiento promedio buque/día/muelle
DESCRIPCIÓN	Medida de productividad de las operaciones de cargue y descargue, relacionada con la oferta de muelle, mientras el buque se encuentra atracado
<p>FÓRMULA</p> $\frac{\left(\sum_{i=1}^n C_i\right) \times 24}{\sum_{i=1}^n T_{\text{muelle}_i}}$ <p>Donde:</p> <p>i, \dots, n: cada uno de los buques que movilizan carga en el terminal, durante el mes (clasificada por tipo de carga)</p> <p>C_i: carga transferida por el buque i (clasificada por tipo de carga)</p> <p>T_{muelle_i}: tiempo bruto de muelle del buque i, registrado en horas</p>	
UNIDAD DE MEDIDA	Toneladas/día/muelle
VARIABLES	Carga transferida, tiempo bruto muelle

INDICADOR SECUNDARIO 1A	
NOMBRE	Rendimiento promedio buque/día/puerto
DESCRIPCIÓN	Muestra la incidencia de las actividades externas y la operación en línea de atraque frente a la permanencia del buque en puerto. Medida de productividad con referencia a todos los eventos que le suceden al buque en el puerto
<p>FÓRMULA</p> $\frac{\left(\sum_{i=1}^n C_i\right) \times 24}{\sum_{i=1}^n T_{\text{puerto}_i}}$ <p>Donde:</p> <p>i, \dots, n: cada uno de los buques que movilizan carga en el terminal, durante el mes (clasificada por tipo de carga)</p> <p>T_{puerto_i}: tiempo de puerto del buque i, registrado en horas</p>	
UNIDAD DE MEDIDA	Toneladas/día/puerto
VARIABLES	Carga transferida, tiempo bruto puerto

INDICADOR SECUNDARIO 1B	
NOMBRE	Rendimiento promedio buque/día/tiempo bruto de operaciones
DESCRIPCIÓN	Muestra el promedio de productividad relacionada con el periodo operativo. Para aquellos casos en que el contrato de fletamento sea WWD ³ , se descontaría el tiempo de lluvias del tiempo operativo.
<p>FÓRMULA</p> $\frac{\left(\sum_{i=1}^n C_i\right) \times 24}{\sum_{i=1}^n T_{\text{bo}_i}}$ <p>Donde:</p> <p>i, \dots, n: cada uno de los buques que movilizan carga en el terminal, durante el mes (clasificada por tipo de carga)</p> <p>T_{bo_i}: tiempo bruto operativo para el buque i, registrado en horas</p>	
UNIDAD DE MEDIDA	Toneladas/día
VARIABLES	Carga transferida, tiempo bruto operativo

3. WWD: esta sigla proviene de la expresión en inglés “weather working days”, utilizada en el tiempo de plancha, que significa que sólo cuentan los días laborables en que el clima permita realizar la carga o descarga.

INDICADOR SECUNDARIO 1C	
NOMBRE	Porcentaje de lluvias
DESCRIPCIÓN	Muestra la posible afectación a la productividad portuaria por efecto de las lluvias
FÓRMULA	$\frac{\left(\sum_{i=1}^n \text{Tiempo de lluvias}_i\right)}{\sum_{i=1}^n \text{Tbo}_i} \times 100$ <p>Donde: <i>i,.....,n</i>: cada uno de los buques que movilizan carga en el terminal, durante el mes (clasificada por tipo de carga) Tiempo lluvias_i: tiempo de lluvias registrado para cada buque <i>i</i>, durante el periodo operativo (clasificado por tipo de carga) Tbo_i: tiempo bruto operativo para el buque <i>i</i>. Registrado en horas</p>
UNIDAD DE MEDIDA	Porcentaje (%)
VARIABLES	Tiempo de lluvias, tiempo bruto operativo

El índice de lluvias permite estimar el impacto que este factor tiene sobre las operaciones, cuantificando su incidencia mediante una relación porcentual; se aclara que corresponde al cociente del tiempo no ope-

rativo por lluvias dividido por el tiempo bruto de las operaciones, por lo que es un índice operativo técnico y no debe entenderse como un índice meteorológico.

INDICADOR PRIMARIO 2	
NOMBRE	Ocupación muelle
DESCRIPCIÓN	Indica la proporción de ocupación del muelle por tipo de carga en relación con la oferta de muelle en el periodo analizado (mes)
FÓRMULA	$\frac{\sum_{i=1}^n \text{Tiempo de muelle}_i \times (\text{eslora promedio} + K \text{ promedio}_{\text{separación}})}{720 \text{ horas} \times \text{longitud de muelle}} \times 100$ <p>Donde: <i>i,.....,n</i>: cada uno de los buques que movilizan carga en el terminal, durante el mes (clasificado por tipo de carga) K promedio_{separación}: resguardo de seguridad entre los buques Longitud muelle: sumatoria de la longitud de los puestos de atraque en análisis</p>
UNIDAD DE MEDIDA	Porcentaje (%)
VARIABLES	Tiempo bruto de muelle, eslora buques mes, K _{separación} total buques mes, longitud de muelle

INDICADOR SECUNDARIO 2A	
NOMBRE	Disponibilidad de muelle
DESCRIPCIÓN	Proporción de muelle que le indica al usuario (naviero o fletador) la magnitud de oferta de muelle con disponibilidad de uso y que permite la asignación de ventanas por parte de la Sociedad Portuaria (concesionario)
FÓRMULA	$\left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{Tiempo muelle}_i \times (\text{eslora promedio} + K \text{ promedio}_{\text{separación}})}{720 \text{ horas} \times \text{longitud de muelle}} \right) \times 100$ <p>Donde: <i>i,.....,n</i>: cada uno de los buques que movilizan carga en el terminal, durante el mes (clasificado por tipo de carga) K promedio_{separación}: resguardo de seguridad entre los buques Longitud muelle: sumatoria de la longitud de los puestos de atraque en análisis</p>
UNIDAD DE MEDIDA	Porcentaje (%)
VARIABLES	Tiempo bruto de muelle, eslora buques mes, K _{separación} total buques mes, número de puestos de atraque, longitud de muelle

INDICADOR SECUNDARIO 2B	
NOMBRE	Ocupación puesto de atraque
DESCRIPCIÓN	Se calcula para puestos de atraque de manera individual. Permite observar el grado de ocupación del terminal relacionado con la ocupación individual de cada puesto de atraque. Este indicador muestra la preferencia, prioridad y condiciones favorables o desfavorables de asignación en atraque por tipo de carga y buque
FÓRMULA	$\frac{\sum_{i=1}^n \text{Tiempo muelle}_i \times \text{eslora promedio promedio}}{720 \text{ horas} \times \text{longitud puesto de atraque}} \times 100$ <p>Donde: <i>i, ..., n</i>: cada uno de los buques que movilizan carga en el terminal, durante el mes (clasificado por tipo de carga) Long. puesto de atraque: longitud puesto de atraque</p>
UNIDAD DE MEDIDA	Porcentaje (%)
VARIABLES	Tiempo bruto en muelle, eslora buques mes, total buques mes, longitud puesto de atraque

INDICADOR PRIMARIO 3	
NOMBRE	Promedio de permanencia de la carga en almacenamiento
DESCRIPCIÓN	Muestra el tiempo de permanencia promedio de la carga en cada uno de los tipos de almacenamiento (silos, bodegas, patios y tanques)
UNIDAD DE MEDIDA	Días
VARIABLES	Días promedio de almacenamiento

INDICADOR PRIMARIO 4	
NOMBRE	Porcentaje de carga directa
DESCRIPCIÓN	Permite medir la cantidad y proporción de la carga que por decisión del usuario o por restricciones de almacenamiento se manejan como operación directa (sin almacenamiento en puerto). Con este indicador se orientan la planificación de la rotación de almacenamientos, la capacidad instalada, disponibilidad de muelle y la conveniencia de las operaciones directas
FÓRMULA	$\left(\frac{\sum_{i=1}^n C_{directa_i}}{\sum_{i=1}^n C_i} \right) \times 100$ <p>Donde: <i>i, ..., n</i>: cada uno de los buques que movilizan carga en el terminal, durante el mes (clasificada por tipo de carga) <i>C_i</i>: carga total transferida por el buque <i>i</i> (clasificada por tipo de carga) <i>C_{directa_i}</i>: carga descargada por despacho directo del buque <i>i</i> (clasificada por tipo de carga)</p>
UNIDAD DE MEDIDA	Porcentaje (%)
VARIABLES	Carga total transferida, carga transferida por despacho directo

INDICADOR SECUNDARIO 4A	
NOMBRE	Rendimiento promedio buque/día/muelle (con carga directa)
DESCRIPCIÓN	Medida de productividad de las operaciones de cargue o descargue directo. Indicador de chequeo que permitiría promover o restringir dicha práctica
FÓRMULA	$\frac{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{directa_{ij}}\right) \times 24}{\sum_{i=1}^n T_{buelle_i}}$ <p>Donde: i,.....,n: cada uno de los buques, descargados o cargados de manera directa, que movilizan carga en el terminal, durante el mes. Clasificados por tipo de carga. Cdirecta_{ij}: carga atendida por despacho directo del buque i (clasificada por tipo de carga) Tbmuelle_i: tiempo bruto de muelle del buque i. Registrado en horas</p>
UNIDAD DE MEDIDA	Toneladas/día/muelle
VARIABLES	Carga transferida en forma directa, tiempo bruto muelle

INDICADOR PRIMARIO 5	
NOMBRE	Promedio de permanencia de vehículos en el terminal portuario
DESCRIPCIÓN	Se cuantifica el tiempo promedio de vehículos dentro del terminal en las actividades de entrega o retiro de carga del terminal, por tipo de carga. Este tiempo involucra la totalidad de actividades relacionadas con el vehículo dentro del terminal (peso y repeso, descargue o cargue, carpado y descarpado y tránsito dentro del terminal) con las esperas correspondientes
FÓRMULA	$\frac{\sum_{j=1}^n (\text{Hora salida del terminal}_j - \text{Hora ingreso al terminal}_j)}{\text{Total vehículos mes}}$ <p>Donde: j,.....,n: cada uno de los vehículos que ingresan al terminal (clasificado por tipo de carga)</p>
UNIDAD DE MEDIDA	Horas/vehículo
VARIABLES	Tiempo de permanencia del vehículo, total de vehículos por mes

INDICADOR SECUNDARIO 5A	
NOMBRE	Promedio de esperas de vehículos
DESCRIPCIÓN	Es el periodo que transcurre desde el momento en que el vehículo ha solicitado ingreso al terminal, hasta que se le permite el paso. Este es un indicador que orienta las decisiones frente a la movilidad en las vías de acceso al terminal y el eventual uso de éstas para parqueo y espera, la disponibilidad de puertas de acceso a los terminales y la necesidad de antepuertos, entre otros
FÓRMULA	$\frac{\sum_{j=1}^n (\text{Hora ingreso}_j - \text{Hora solicitud para ingreso}_j)}{\text{Total vehículos mes}}$ <p>Donde: j,.....,n: cada uno de los vehículos que ingresan al terminal (clasificado por tipo de carga)</p>
UNIDAD DE MEDIDA	Horas/vehículo
VARIABLES	Hora solicitud ingreso, hora ingreso, total vehículos mes

Los indicadores se pueden manejar con la periodicidad que la autoridad competente lo requiera, aunque se recomienda hacerlo en intervalos mensuales que permitan su evaluación en periodos trimestrales y semestrales.

REFERENTES INTERNACIONALES

Con el fin de hacer un análisis comparativo de indicadores se tomaron como referencia los puertos de Veracruz, Manzanillo y Lázaro Cárdenas, en México, por tener unas características similares a la SPRBUN, como

es el hecho de ser puertos multipropósito y movilizar gran cantidad de graneles ordinarios. Esta afinidad permite realizar una comparación más acertada, con el propósito de determinar ejemplos de eficiencia en la operatividad. Igualmente, según el escalafón portuario latinoamericano elaborado por *América Economía Intelligence*, los puertos mexicanos están ubicados entre los quince primeros puestos⁴.

Cabe destacar que los cinco mejores puertos del mundo son Shanghái, Singapur, Hong Kong y Shenzhen en China, y Busan en Corea de Sur; igualmente Rotterdam, en los Países Bajos, es considerado el puerto más grande de Europa⁵. Sin embargo, estos puertos son especializados en contenedores, característica que difiere de las condiciones multipropósito de la SPRBUN, por lo cual no se tuvieron en cuenta en el análisis comparativo.

El puerto de Veracruz se constituye como punto de referencia internacional; históricamente, ha sido el puerto comercial más importante de México, ya que brinda servicio a múltiples tipos de carga a partir de subterminales especializadas mecanizadas³ y semimecanizadas⁶. La SPRBUN tiene un desempeño similar al puerto de Veracruz en subterminales semimecanizadas, pero es notable el incremento del rendimiento en Veracruz al implementar sistemas mecánicos continuos para movilizar la carga. De acuerdo con lo anterior, la operación de cargue/descargue de graneles alimentarios en las instalaciones de la SPRBUN se debería realizar por medios especializados de buque a bodega, alcanzando productividades medias por buque no inferiores

a 10.000 t/día⁸ inicialmente, en lugar de las 2.862 t/día⁹ actuales.

En Colombia se está viviendo un momento económico para el mercado de graneles sólidos similar al experimentado por México en el periodo comprendido entre los años 1995 y 1999, donde solamente en Veracruz se aumentó en un 150 % el manejo de graneles agroalimentarios (un incremento del orden de los tres millones de toneladas al año); este fue un periodo enmarcado por una fuerte presión sobre el sistema portuario y los sistemas e infraestructura de transportes vinculados a los flujos comerciales de los puertos¹⁰, que obligó a reestructurar su intermodalidad. En el caso de Veracruz, a partir de la inversión y participación de entes privados se consiguió duplicar los rendimientos en muelle en menos de diez años, con la priorización de servicio a partir de sistemas mecanizados¹¹ en terminales a los que denominaron especializados y ofreciendo una segunda alternativa con sistemas semimecanizados¹² en terminales no especializados, donde en el mismo periodo de tiempo lograron triplicar el rendimiento en operaciones, todo esto integrado en un gran plan de reestructuración.

Aunque existen roles similares en la economía del país, a pesar de que ambos son los principales puertos nacionales en manejo de graneles sólidos agroalimentarios de su respectivo país, existe una gran diferencia tanto en el ambiente comercial como en el geográfico y el volumen mismo de sus escalas de producción, pues apenas en el año 2000 el puerto de Veracruz ya movilizaba alrededor de 5,4 millones de toneladas al año, mientras que la SPRBUN en el año 2012 apenas se acercaba a los 4 millones de toneladas.

4. *Ranking de los mejores puertos de América Latina 2014* [en línea]. Asociación Latino Americana de Puertos y Terminales – latinports [fecha de consulta: 29 de enero de 2015]. Disponible en <<http://latinports.org/ranking-de-los-mejores-puertos-de-america-latina-2014/>>.
5. *50 puertos más importantes para comercio internacional. Parte 1* [en línea]. Instituto Nacional de Comercio y Aduanas [fecha de consulta: 29 de enero de 2015]. Disponible en <<http://www.comercioyaduanas.com.mx/comercioexterior/comercioexterioraduanas/407-50-puertos-mas-importantes-para-comercio-internacional-parte-1>>.
6. Sistema mecanizado: aquel en que la carga se moviliza por sistemas mecánicos continuos, que arrancan de depósitos *ad hoc* ubicados en sus inmediaciones (bandas transportadoras, ductos conductores, etc.).
7. Sistema semimecanizado: aquel en que la carga se moviliza por sistemas mecánicos no continuos, sin depósitos *ad hoc* (desde carros tolva, por *chutes* u otros sistemas a buques).

8. Rendimiento buque/día/muelle.

9. Rendimiento buque/día/muelle.

10. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte, año 2000. Plan de Integración Modal Puerto de Veracruz [en línea]. México, 2000. Disponible en <<http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt150.pdf>>.

11. Sistema mecanizado: el cargue se opera con sistemas mecánicos que conducen la carga directamente desde el buque hasta instalaciones especializadas para su posterior despacho (caso importación).

12. Sistema semimecanizado: descarga directa del buque a vehículo terrestre en muelle.

En cuanto a la ocupación admisible, es importante aclarar que se puede calcular mediante la utilización de la teoría de colas o por medio de modelos de simulación; en la bibliografía existente (Unctad, 1984; MOPT, 1992; Thoresen, 2003; Agerschou, 2004; González-Herrero et al., 2006; OPPE, 2006, entre otros), existen diversas recomendaciones, unas más rigurosas que otras, para definir la ocupación admisible o la calidad del servicio asociada a la espera relativa aceptable a las terminales portuarias. De acuerdo con la Fundación Valencia Port, la ocupación admisible va asociada a un número de atraques al mes, lo que se traduce en una determinada calidad del servicio relacionada con la espera de los buques, dependiendo de las distribuciones de llegadas y del tiempo de servicio; es decir, para una misma espera relativa, en función de la caracterización del sistema¹³ y del número de atraques, se obtienen distintas tasas de ocupación admisibles.

El tiempo de permanencia de la carga en áreas de almacenamiento es esencial en la capacidad dinámica de un terminal portuario, dado que una alta tasa de estancia significa una subutilización de la infraestructura; la medición de esta variable es fundamental si se tiene en cuenta el propósito de optimizar el servicio, pues áreas de almacenamiento llenas son causa de descargue directo a camión, que convierte de manera automática un sistema de cargue mecanizado en uno semimecanizado; la operatividad óptima de un terminal recomienda transferencia a almacenamiento, alta capacidad estática y mecanización de bodegas, esto es, sistemas logísticos mecánicos que permitan la continua operatividad de transferencia de carga buque-muelle-almacenamiento. Por lo anteriormente descrito, el descargue directo se debe evaluar, medir y regular, razón por la que se propuso este indicador.

El promedio de permanencia de vehículos en el terminal permite medir y evaluar el desempeño de los sistemas de despacho de carga en la Sociedad Portuaria, y de manera directa, la efectividad del tránsito interior, más específicamente el porteo¹⁴, que es una importan-

te variable del sistema portuario. Este indicador mide de manera directa el servicio de despacho de carga y progresivamente medirá el impacto de las medidas de optimización implementadas para disminuir el descargue directo a vehículo.

Los rendimientos promedio del servicio de transferencia de carga general son menores que en los graneles, pues son tipos de carga con grandes diferencias en su manejo logístico por las características propias de los productos o por exigencias de los propietarios de la carga.

RECOMENDACIONES

De las variables más representativas que intervienen en la determinación de la capacidad portuaria, se seleccionaron aquellas que presentan el poder de influencia más alto (de acuerdo con los resultados de la metodología del análisis estructural), para con base en ellas definir las recomendaciones que se van a proponer y de este modo intervenir en las variables restantes del sistema.

Cabe señalar que para la evolución del subsector portuario se requiere la participación activa de los diferentes actores en la cadena logística del transporte, como el Ministerio de Transporte, la Superintendencia de Puertos y Transporte, la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), el Instituto Nacional de Vías, el Departamento Nacional de Planeación, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el ICA, el Invima, el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, la Alcaldía de Buenaventura, la SPRBUN y operadores portuarios.

A partir de los resultados obtenidos y mencionados anteriormente, se establecen las siguientes recomendaciones:

- Realizar ajustes y modificaciones normativas e institucionales en el tema portuario.
- Generar mecanismos para ampliar las áreas operativas de la sociedad portuaria para las necesidades actuales y futuras.
- Implementar revisiones fitosanitarias 7 días a la semana 24 horas, garantizando inspecciones nocturnas y en fines de semana.
- Exigirles a los operadores rendimientos mínimos de servicio y productividad.
- Aumentar la productividad buque-muelle de las sociedades y operadores portuarios.

13. Distribución de llegadas, tiempos de operación de cargue y descargue.

14. Portear: conducir o llevar algo de una parte a otra por el porte o precio convenido o señalado [en línea] [fecha de consulta: 2 de enero de 2014]. Disponible en < <http://lema.rae.es/drae/?val=porteo>>.

- Establecer límites a la operación de cargue/descargue directo.
- Mantener un sistema tarifario que desestime el almacenamiento prolongado en puerto.
- Optimizar áreas y tecnologías para manejo y almacenamiento de carga general, especialmente de vehículos, tuberías y cargas de proyecto.
- Mejorar gestión de puertas y circulación interior de vehículos en zona portuaria.
- Gestionar la coordinación de las obras de acceso a la zona portuaria de Buenaventura para reducir los tiempos de viaje por carretera.
- Fortalecer el sistema de regulación de tráfico en el acceso y circulación de camiones de carga a la zona portuaria en el municipio de Buenaventura.
- Promover sistemas de transporte masivos de carga entre la zona portuaria y el interior del país.
- Adecuar la infraestructura de canal de acceso acuático y carreteras a la zona portuaria.
- Incentivar el logro de acuerdos entre las sociedades portuarias y la comunidad portuaria (operadores portuarios, importadores-exportadores, transportadores terrestres, navieros, etc) para optimizar la cadena logística.

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de este trabajo se encontraron indicadores definidos por entidades de gran trayectoria internacional, pero los que se proponen en este proyecto se elaboraron teniendo en cuenta su incidencia en aspectos fundamentales, como la capacidad y la operación portuaria.

A partir de la metodología de análisis estructural implementada en el proyecto, se puede concluir que las variables más representativas que inciden en la capacidad portuaria son:

- Variables determinantes o influyentes: existencia de autoridades portuarias, revisión del marco legal regulatorio del sector portuario, volumen de operación por escala, longitud de atraque en gestión única, capacidad inversionista de la empresa portuaria,

existencia de un plan maestro por cada puerto y plancha contratada.

- Variables altamente dependientes: productividad de buque, demoras en atraque, disponibilidad de muelle, tasa de ocupación.

Si se implementan buenas prácticas en la operación de los puertos del país se pueden reducir significativamente los costos de importación que se transfieren al cliente o consumidor final, generando un beneficio social de gran impacto.

Debido a la gran importancia que tiene el comercio exterior en el crecimiento económico de un país en desarrollo, es fundamental analizar el sistema portuario e implementar estrategias que mejoren su operación para hacerlo más eficiente.

En vista de los retos que adquirió Colombia con la suscripción de los tratados de libre comercio, es necesario que además de la inversión destinada a infraestructura de transporte nacional, se revisen y se optimicen los procesos internos de los puertos con el fin de lograr una mejora integral, y que además contribuya a que el país sea más competitivo frente a otros puertos que operan en la costa pacífica.

REFERENCIAS

1. Doerr, O. & Sánchez, R. J. (2006). *Indicadores de productividad para la industria portuaria. Aplicable en América Latina y el Caribe*. División de Recursos Naturales e Infraestructura, Cepal. Serie 112. Santiago, Chile. Publicación de las Naciones Unidas. ISSN electrónico 16809025. ISBN: 9213229496.
2. Fernández, J. (2011). Puerto de Veracruz. Administración Portuaria Integral de Veracruz, S.A. de C.V. Datos estadísticos del Movimiento de Carga y Buques.
3. Godet, M. (2001). *Manual de prospectiva estratégica*. París: Dunod.
4. Kent, P.E. & Ashar, A. (2009). *Indicators For Port Concession Contracts And Regulation: The Colombian Case*. International Association of Maritime Economies.
5. Monfort Mulinas, A. et al. (2011). *Manual de capacidad portuaria*. Fundación Valenciaport.
6. Nathan Associates Inc. (2008). *Port Performance Indicators for Concession Agreements in Colombia. Research Report (Draft)*. March. Infrastructure Planning and Economics.
7. Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México (2011). *Informe estadístico de los puertos de México*. Anexo I: Rendimientos por tipo de carga. México, D.F.: Coordinación General de Puertos y Marina Mercante, Dirección General de Puertos.

Alternativas para el suministro de agua apta para el consumo a pueblos indígenas en Colombia con condiciones geográficas particulares

Alternatives for drinking water supply to indigenous peoples in Colombia in extraordinary geographical conditions

JOSÉ MANUEL VÁSQUEZ LEAL¹ - HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ²

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil e hidrólogo. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

manuelvasquezingenieria@gmail.com - alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co

Recibido: 20/03/2017 Aceptado: 22/04/2017

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

Resumen

En este artículo se desarrolla una metodología para plantear alternativas técnicas que posibiliten suministrar agua apta para el consumo a los pueblos indígenas en diferentes regiones de Colombia, dependiendo de su ubicación geográfica, mediante el desarrollo de seis etapas básicas, como la identificación de la comunidad y sus características, las características de la región, la definición de sus necesidades, su localización, distribución, grado de dispersión de las viviendas y otros parámetros. Se pretende que esta metodología se convierta en una herramienta de gestión útil en la toma de decisiones relacionadas con el suministro de agua apta para el consumo a las comunidades indígenas en Colombia.

Palabras claves: potabilización, suministro, alternativas de suministro, suministro no convencional, suministro de agua para comunidades rurales, suministro de agua para comunidades indígenas, agua y enfoque diferencial.

Abstract

This article aims at developing a methodology to propose alternative techniques that enable drinking water supply to indigenous communities in different regions of Colombia, according to their geographical location through the development of six basic stages, identifying the community and their characteristics, the regional characteristics, defining their needs, their location, distribution, home dispersion, and other parameters.

This methodology is expected to become a useful management tool for decision-making in drinking water supply to indigenous communities in Colombia.

Keywords: potabilization, supply, alternative supply, non-conventional supply, rural communities water supply, indigenous community water supply, water and differential approach.

ANTECEDENTES

Los acueductos convencionales no han sido efectivos para dar solución a la necesidad de las comunidades indígenas de contar con agua apta para su consumo, debido a que en los criterios de diseño de dichos sistemas de suministro no se tomaron en cuenta las características propias de las comunidades indígenas, lo que provocaba su abandono por la comunidad y la comercialización de sus partes.

Según el Censo DANE 2005, en Colombia se auto-reconocieron como indígenas 1.392.623 personas, que representan el 3,36 % de la población total. En estudios posteriores se determinó que el 4 % cuenta con agua potable y solamente un 1 % tiene condiciones básicas y adecuadas de saneamiento. Actualmente, 32 de los 102 pueblos indígenas reconocidos por el gobierno nacional corren el riesgo de desaparecer, debido a la falta de condiciones saludables en el consumo de agua y a la disposición inadecuada de excretas y de residuos.

Los departamentos que presentan mayores problemas en cobertura indígena de acceso a fuentes mejoradas de abastecimiento de agua son Arauca, Chocó, La Guajira, Vichada, Guainía, Amazonas, Casanare, Magdalena, Guaviare y Boyacá, los cuales agrupan el 28 % de esta población.

A escala regional se destacan las regiones pacífica y caribe donde se concentra la mayoría de la población sin servicio.

En el siguiente gráfico se evidencia el rezago existente entre las coberturas de acceso a fuentes mejoradas de abastecimiento de agua de las comunidades indígenas frente al resto del país, destacando el hecho de que en

el ámbito rural estas comunidades tienen un rezago más de quince puntos porcentuales en relación con el resto de etnias del país.

Con respecto al suministro de agua potable en los resguardos indígenas, en el área rural de los 237 municipios donde existen resguardos indígenas, en 107 se suministra agua con algún nivel de riesgo, en 124 no hay información disponible y en 6 se suministra agua potable, según datos del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Agua Potable (Sivicap), del Instituto Nacional de Salud.

Uno de los orígenes del problema es la forma como se define la fuente de suministro, debido a que la mayoría de las veces la fuente seleccionada no garantiza que el agua que se obtiene presenta condiciones aptas para su consumo y, sin embargo, se aprovecha sin que se le realice algún tratamiento previo.

Las principales causas que originan el problema técnico son las siguientes:

- Captaciones técnicamente mal construidas, sin ningún estudio previo y sin medidas para la prevención de accidentes.
- Falta de sistemas de conducción de las fuentes de suministro hasta las comunidades.
- Almacenamiento antihigiénico.

Los problemas técnicos que se presentan con mayor frecuencia en las fuentes de suministro de las poblaciones indígenas en Colombia se generan principalmente por la falta de mantenimiento y de tratamiento del agua.

INTRODUCCIÓN

En este artículo se expone una guía metodológica con la selección de un conjunto de alternativas técnicas para el suministro y tratamiento de agua, la cual es aplicable a los pueblos indígenas de Colombia, ubicados en zonas rurales¹ de tres regiones del país. Las alternativas de tratamiento y suministro expuestas pueden ser colectivas o individuales, para que, dependiendo de la

1. Según el DNP y el DANE, se entiende como zona rural el espacio comprendido entre el límite de la cabecera municipal o perímetro urbano y el límite municipal.

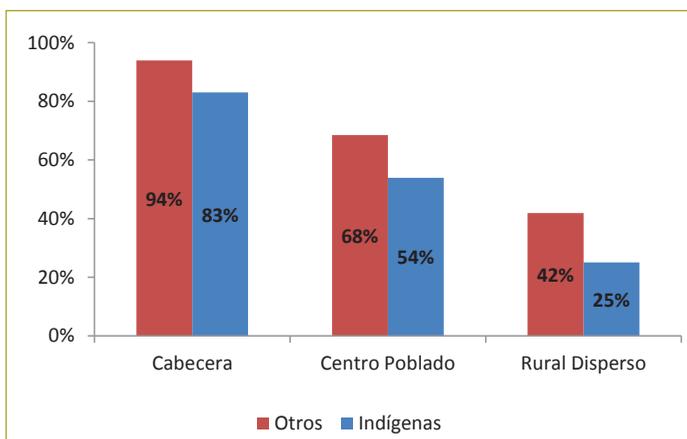


Gráfico 1. Cobertura del servicio de acueducto por regiones.

Fuente: Redatam - DANE. Cálculos: José Manuel Vásquez Leal.

aglomeración o dispersión de las viviendas y de otras variables, el planificador seleccione la opción que más beneficie a la comunidad.

La metodología, las alternativas de suministro y los procedimientos de tratamiento de agua se presentan en un lenguaje práctico y una estructura acorde con la de documentos guía y títulos del RAS, con el fin de facilitar su uso a los ingenieros y planificadores locales. Además, para complementar los temas de acueducto y potabilización se pueden consultar los títulos B, C, D, E y F, y los manuales de prácticas de buena ingeniería del RAS.

OBJETIVO

El objetivo es la presentación de una guía metodológica en la que se plantea la selección de alternativas técnicas para el suministro de agua apta para el consumo a comunidades indígenas en Colombia, considerando seis etapas que empiezan con la identificación de la comunidad indígena y de sus características y culmina con la socialización y el seguimiento al modelo adoptado.

METODOLOGÍA

Se hicieron una recopilación y un análisis de información del estado actual de los proyectos de suministro de agua potable para este tipo de comunidades, evaluando al mismo tiempo la efectividad de los proyectos e identificando factores característicos de las comunidades, como sus hábitos en cuanto a saneamiento e higiene, sus formas de organización, su cultura y el grado de dispersión de sus asentamientos, entre otros factores.

Paralelo a esto, en los marcos nacional y regional se determinó cuáles son los principales departamentos y regiones que sufren de la carencia de un suministro efectivo, identificando aquellas donde se podría plantear una serie de alternativas de solución de acuerdo con las características de cada región, analizando factores como la disponibilidad al recurso hídrico característica de la región y su demografía.

Como complemento normativo de esta investigación técnica se identificaron la normatividad y la legislación nacional vigentes sobre las comunidades étnicas y el derecho a los servicios básicos, sobre todo el suministro de agua. Parte de la investigación consistió, además, en

conocer los antecedentes en la prestación de servicios para comunidades indígenas en Colombia a través de recopilación y análisis de información y visitas realizadas a comunidades de diferentes etnias del país.

Así mismo, se investigó sobre las alternativas no convencionales de suministro y potabilización de agua que se han llevado a cabo en el país y en el mundo, por parte de diferentes tipos de organizaciones, con experiencias favorables y proyectos eficaces.

Con base en la experiencia lograda en esta investigación y la experiencia propia de sus autores, se determinó la guía metodológica, objeto del presente artículo, en la que se plantean seis etapas para considerar dentro de la formulación y ejecución de esta clase de proyecto en comunidades indígenas.

CONCEPCIÓN DE UNA GUÍA METODOLÓGICA PARA EL SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA PARA UNA COMUNIDAD INDÍGENA EN COLOMBIA

Teniendo en cuenta los problemas de tipo técnico, económico y social de las comunidades indígenas rurales en el país, en este artículo se presenta una metodología junto con una serie de alternativas técnicas de suministro y de potabilización, seleccionadas para concebir de manera efectiva el suministro de agua apta para el consumo de estas comunidades.

Para concebir un sistema de suministro de agua, en este caso para comunidades indígenas, se recomienda tomar como referencia el diagrama de flujo esquematizado en la página siguiente (ilustración 1). Mediante la concepción de esta guía se busca satisfacer las necesidades de las comunidades indígenas en Colombia en materia de suministro y potabilización de agua, al tener en cuenta las consideraciones propias de su cultura, como la creencia del no pago por el servicio de suministro de agua, la permanencia de las comunidades —que las diferencia en permanentes, seminómadas y nómadas—, la escasez de personal técnico para la operación y mantenimiento de los sistemas convencionales y, la falta de ingresos económicos de la comunidad, que provocan que ésta desmonte la infraestructura para darle usos diferentes.

Es preciso destacar que de acuerdo con las experiencias logradas por la Unicef y la OMS en el mundo, en esta guía se plantea involucrar a toda la comunidad en la construcción del sistema promoviendo la participación



Fotografía 1. Indígenas construyendo el sistema.
Fuente: Comunidad Uhry Uaspam, Nicaragua.



Fotografía 2. Mujeres indígenas involucradas en las actividades de construcción del sistema.
Fuente: Comunidad Uhry Uaspam, Nicaragua.

de género, lo cual ha generado muy buenos resultados en la operación y sostenibilidad de los sistemas, creando así la comprensión y concientización sobre el sentido de pertenencia y sentimiento de empoderamiento de los pueblos sobre los sistemas de abastecimiento.

A continuación se esquematizan y se desarrollan las seis etapas propuestas en esta guía metodológica (ilustración 1).

ETAPA 1. Identificación de la comunidad y sus características

El objetivo propuesto para esta primera etapa es reconocer las características de localización de la comunidad indígena, identificando el sector donde se ubica, si es rural o urbano, la frecuencia con que se traslada de un lugar a otro y el grado de dispersión de las viviendas. Esto con el fin de empezar a identificar los tipos de solución de suministro que se podrían brindar a la comunidad (ilustración 2).

ETAPA 2. Identificación de las características de la región

Luego de conocer cómo se agrupa y dónde se localiza la comunidad indígena, se deben identificar las características de la región donde habita.

De acuerdo con la región predominarán un tipo de clima de hidrografía y de topografía, que ayudará a determinar las condiciones del proyecto. Estas caracte-

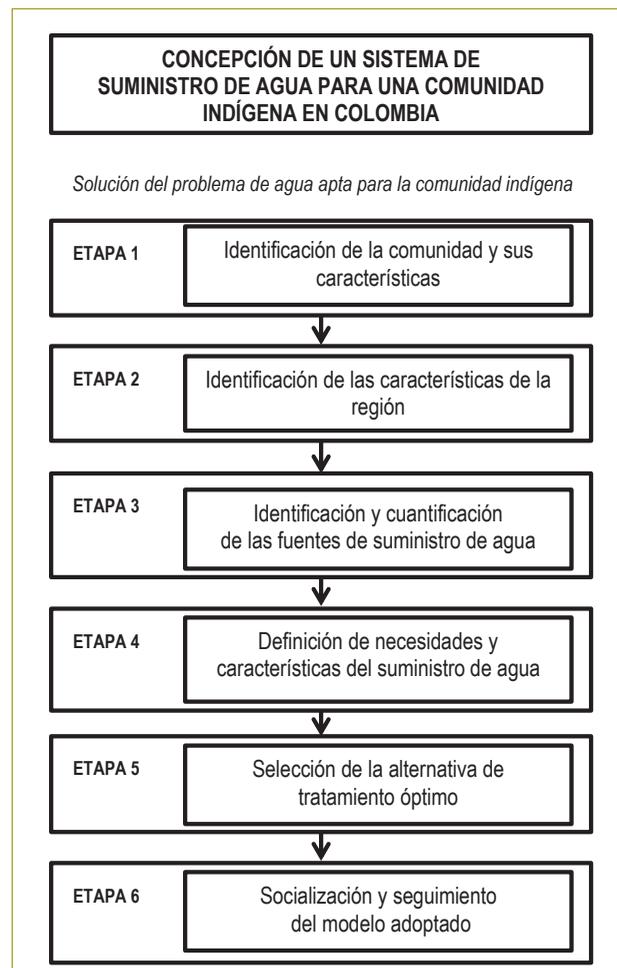


Ilustración 1. Concepción de un sistema de suministro de agua para comunidades indígenas en Colombia.
Fuente: El autor.

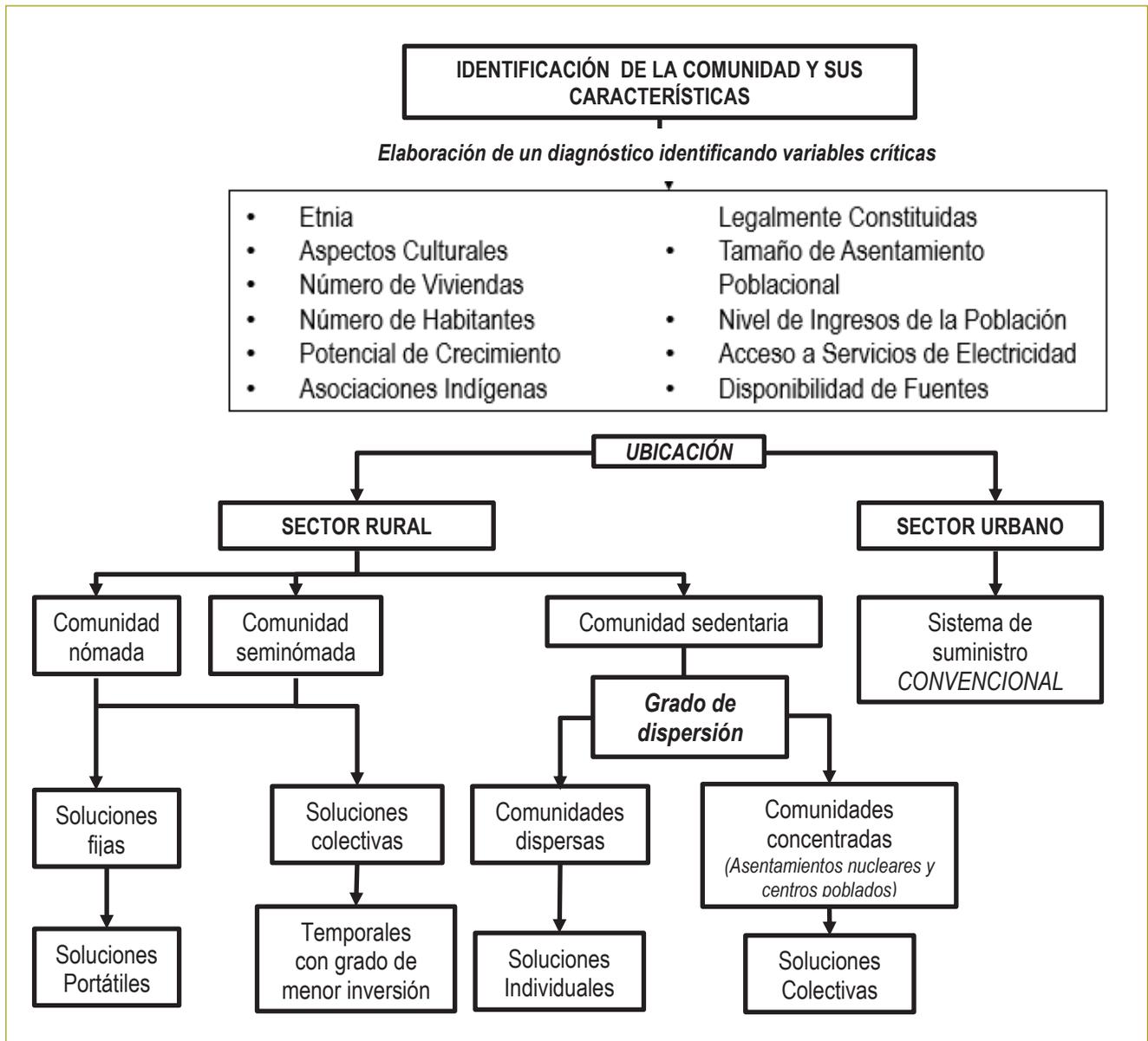


Ilustración 2. Etapa 1. Identificación de la comunidad y sus características.

Fuente: El autor.

rísticas, junto con el número de viviendas, cantidad de familias, sus actividades económicas y sus costumbres, definirán la capacidad de agua apta para el consumo

que debe proveer el sistema de abastecimiento. A continuación se presentan las características de la región que deben definirse en esta segunda etapa (ilustración 3).

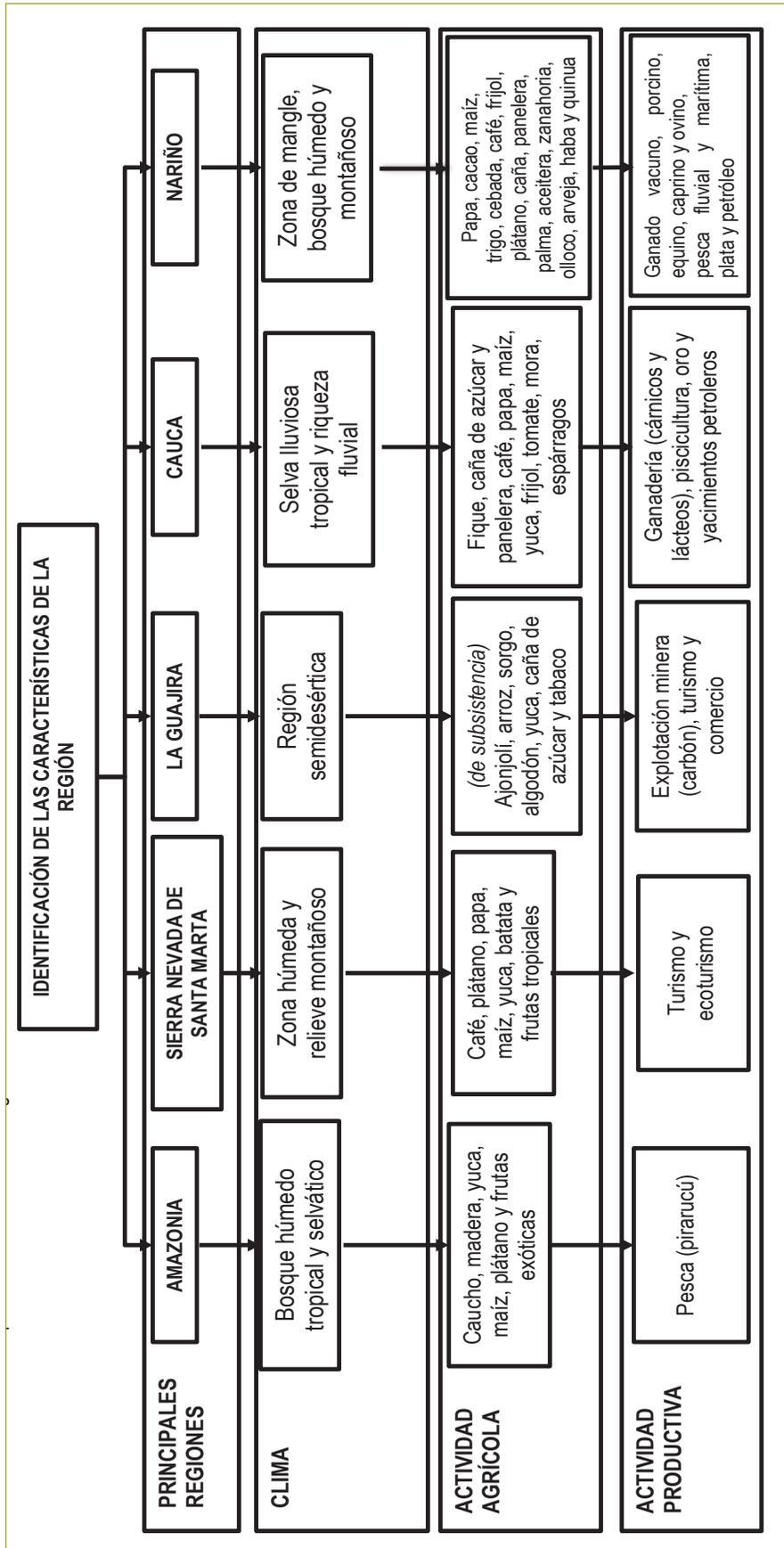


Ilustración 3. Etapa 2. Identificación de las características de la región.

Fuente: El autor.

ETAPA 3. Identificación e inventario de las fuentes de suministro de agua para una comunidad indígena en Colombia

Para el desarrollo de esta tercera etapa se deben identificar y cuantificar las fuentes de suministro de agua, estableciendo las que serían las fuentes principales y las fuentes que se podrían utilizar como secundarias. De acuerdo con este concepto, se presentan las posibles fuentes de suministro que se pueden encontrar en una u otra región; sin embargo, dada la biodiversidad de nuestro territorio, es muy posible encontrar otros tipos de fuentes de suministro (ilustración 4).

ETAPA 4. Características y necesidades del suministro de agua

Una vez definida la fuente de suministro, si es superficial, subterránea o de otro tipo, se deberá establecer el

tipo de operación del sistema de abastecimiento, si es individual o colectivo, de acuerdo con el tipo de fuente, la cercanía de la comunidad a la fuente y los recursos económicos con que cuenta el proyecto.

Así mismo, habrá que definir la forma como se realizará la conducción de agua desde la fuente hasta un punto de entrega comunal o una red de distribución. Para el caso en que se decida optar por una solución no convencional de purificación del agua, de igual manera se recomienda, en pro de la integralidad del proyecto, definir cómo se hará la conducción desde la fuente hasta cada una de las viviendas o hasta un punto de entrega comunal a la cual todas las familias concurren de manera fácil, de acuerdo con lo propuesto en la página siguiente (ilustración 5).

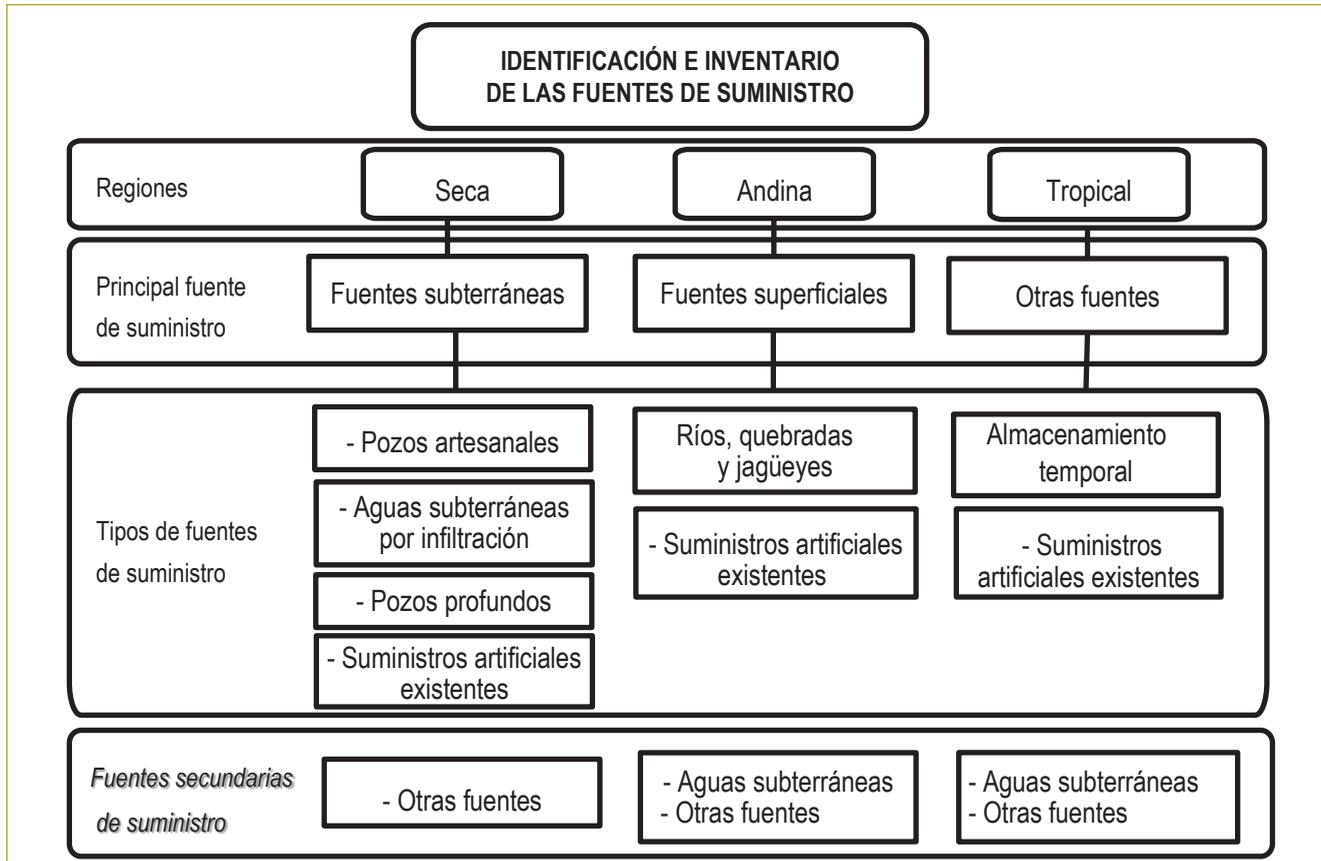


Ilustración 4. Etapa 3. Identificación y cuantificación de las fuentes de suministro de agua para una comunidad indígena en Colombia.

Fuente: El autor.

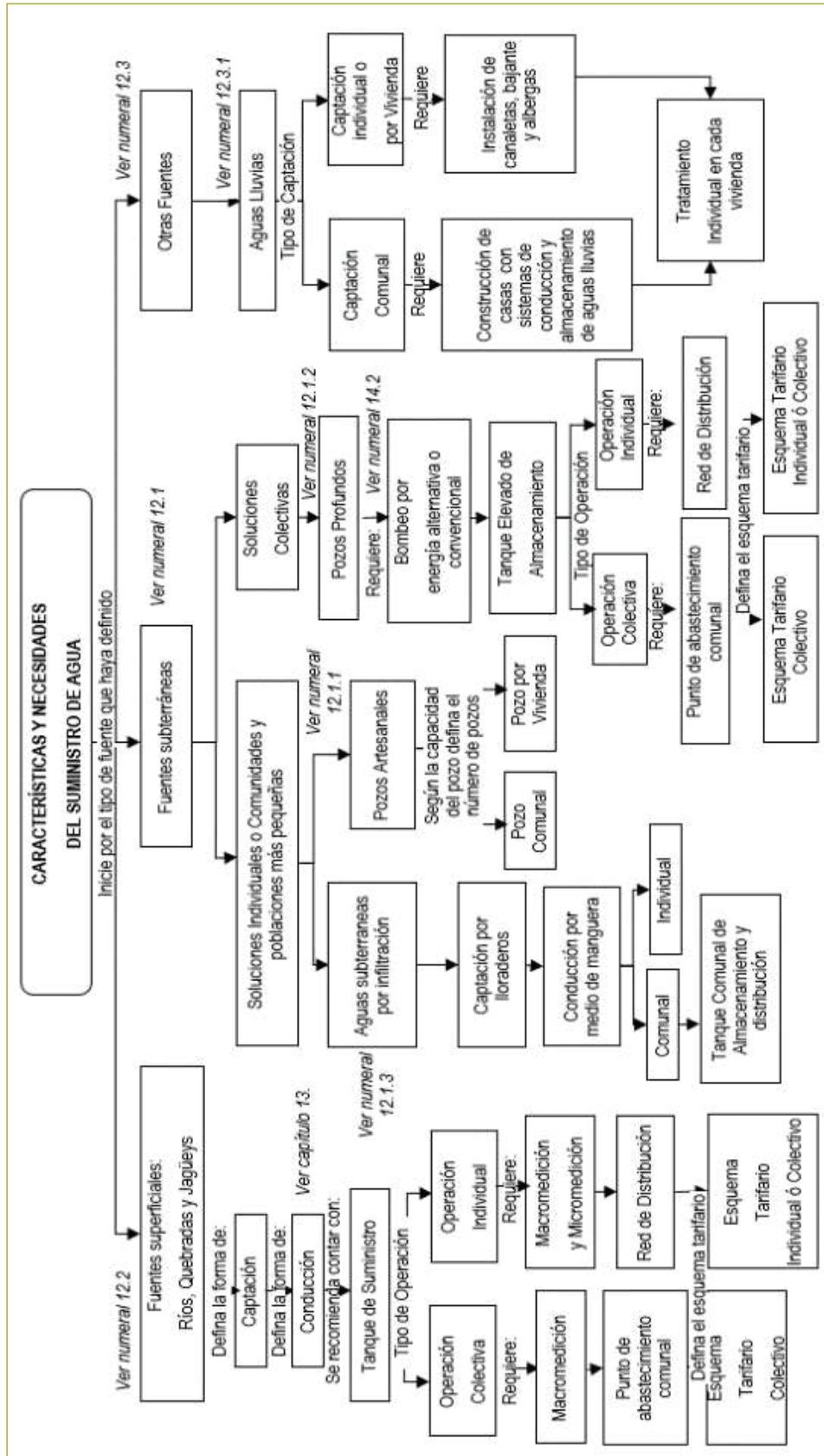


Ilustración 5. Etapa 4. Definición de necesidades y características del suministro de agua.

Fuente: El autor.

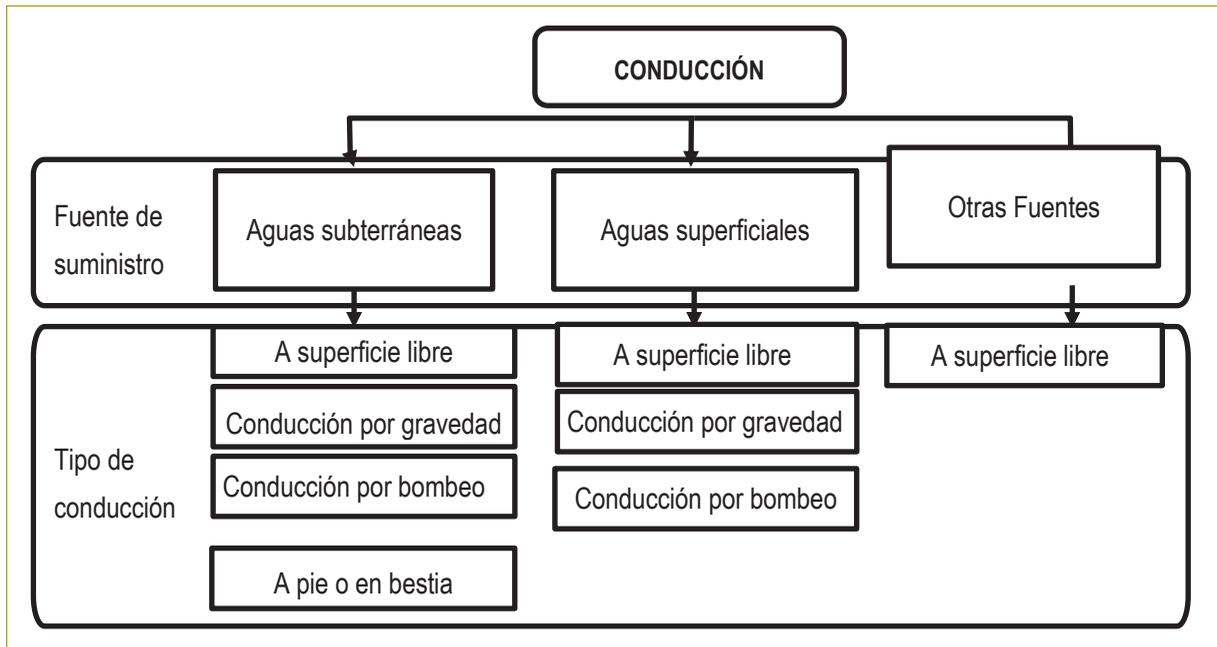


Ilustración 6. Selección de la forma de conducción.

Fuente: El autor.

Si se opta por una solución colectiva que involucre una conducción, se deberá definir si se aplicará a la comunidad un régimen tarifario, lo cual es lo más recomendable para la sostenibilidad del acueducto por razones sociales y técnicas; si se establece este régimen, habrá que decidir si será una tarifa colectiva o individual, con el propósito de cuantificar y definir la necesidad y la localización de macromedidores y micromedidores. En caso de que el régimen tarifario definido sea el colectivo, no será necesaria la instalación de micromedidores, independientemente de si existe red de distribución o no.

El régimen tarifario deberá contemplar la periodicidad del cobro, que podrá ser mensual, bimestral, trimestral, semestral, anual o solamente cuando se requieran reparaciones, o por el contrario, definir si no se debe cobrar el servicio a los suscriptores.

ETAPA 5. Selección de la alternativa de tratamiento

La selección de la alternativa de tratamiento para una comunidad indígena en Colombia se realizará una vez definidas las cuatro etapas anteriores. De acuerdo con

las características físico-químicas del agua captada y las necesidades de la comunidad, deberá escogerse la alternativa individual o colectiva (ilustración 7).

Como soluciones de tratamiento de agua cruda, para este tipo de comunidades hay que considerar las alternativas técnicas, con tecnologías sencillas, eficaces y sostenibles. Estos sistemas de tratamiento no convencionales están más en consonancia con las características de la población indígena rural dispersa, ya que no requieren una gran inversión económica para su montaje y puesta en funcionamiento ni una gran capacidad técnica para su operación y mantenimiento. Además, se debe analizar si es conveniente una alternativa de tratamiento individual o una colectiva.

Fuera de las alternativas expuestas en esta guía, se pueden considerar un sinnúmero de propuestas que ayudarían a brindar una solución a la falta de abastecimiento de agua apta para el consumo, siempre y cuando cumplan con los principios mencionados de ser tecnologías sencillas, eficaces y sostenibles, y se desarrollen teniendo en cuenta cada una de las etapas aquí planteadas.



Ilustración 7. Etapa 5. Selección de la alternativa de tratamiento óptimo.

Fuente: El autor.

ETAPA 6. Socialización y seguimiento del modelo adoptado

Para que el modelo de concepción de un sistema de suministro de agua apta para consumo de una comunidad indígena en Colombia sea efectivo en el tiempo, desde el inicio de la primera etapa y durante el desarrollo de las cinco etapas anteriores, y también una vez cumplidas esas cinco etapas, se deberá involucrar a la comunidad, socializar y hacer seguimiento del modelo. Para esto se debe establecer la participación de la comunidad, definiendo metas y logros, así como realizar un acompañamiento social para determinar las pautas de operación y mantenimiento del modelo adoptado.

Al generar en la comunidad conocimientos y habilidades con base en un sentido de pertenencia social, sin perder su identidad cultural, se logrará promover la apropiación del proyecto y su correcto uso. Sin embargo, cada uno de estos pasos se tendrá que socializar

y retroalimentar con la comunidad indígena para que se establezcan unos protocolos que promuevan los impactos positivos, anulen los negativos y no se abandone el proyecto.

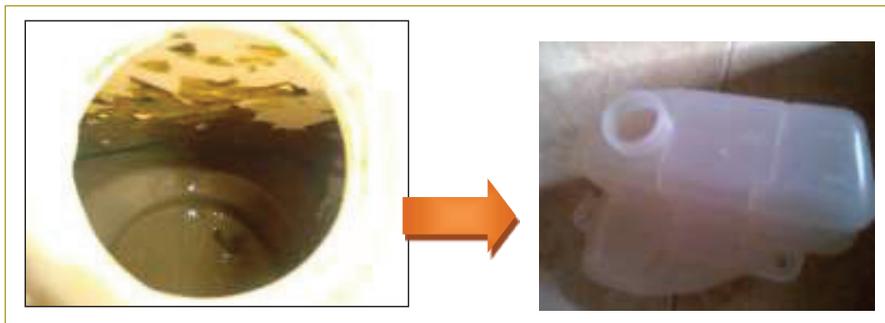
Desde el principio de este proceso, es importante capacitar y concientizar a la comunidad de la importancia que tienen las buenas prácticas de seguridad e higiene, como el lavado frecuente de manos, de pimpinas y recipientes o tanques de almacenamiento, para garantizar la efectividad de estos proyectos de suministro.

En la siguiente fotografía se observa el crecimiento de algas en las paredes internas de una pimpina o recipiente para transporte y almacenamiento de agua, así como la presencia de animales muertos en su interior. En contraste, en la fotografía de la derecha se ilustra un claro ejemplo del correcto mantenimiento del sistema de recolección o almacenamiento (fotografías 2 y 3).



Ilustración 8. Etapa 6. Socialización y seguimiento del modelo adoptado.

Fuente: El autor.



Fotografía 2. Interior de una pimpina o recipiente para transporte y almacenamiento de agua.

Fuente: Fucai, 2012. Comunidad de Patsuain, Manaure, Colombia.

Fotografía 3. Mantenimiento y limpieza adecuados de pimpinas o recipientes.

Fuente: Fucai, 2012. Comunidad de Patsuain, Manaure, Colombia.

CONCLUSIONES

- En la guía metodológica presentada se promueve el desarrollo sostenible de sistemas de suministro de agua apta para el consumo de las comunidades indígenas en Colombia. Para ello se plantearon seis etapas, en las cuales se exponen los criterios para la formulación de este tipo de proyectos.
- En la primera etapa de esta guía se propone identificar los aspectos básicos de la comunidad en estudio, propiciando la coordinación permanente entre el formulador de proyectos y dichas comunidades, con el fin de lograr coherencia e integralidad entre las necesidades de la comunidad y la solución.
- Según experiencias de organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud y la Unicef, en el marco de un diagnóstico integral de las condiciones de abastecimiento de agua de las comunidades indígenas en los aspectos técnicos, organizativos, socioculturales, ambientales y de sostenibilidad, entre otros, el “aporte comunal”, que tiene como principio la vinculación de toda la comunidad, incluso de sus mujeres, convierte a los indígenas en los protagonistas de las transformaciones de sus niveles y calidad de vida, generando muy buenos resultados en cuanto a su operación y sostenibilidad.
- En la etapa 2 se propone identificar las características de la región, como clima, tipo de suelo y actividad socioeconómica, para posteriormente en la etapa 3, con base en las condiciones de la región, identificar y cuantificar las fuentes de suministro. Además, en esta última etapa se permite tomar en consideración todas las oportunidades de suministro que brinda la región, calificándolas de fuentes de suministro primarias y secundarias, como aporte a la evaluación previa de la selección de cualquier alternativa de suministro.
- En el desarrollo de la etapa 4 se define un sistema de suministro que suple las necesidades de la comunidad de manera eficiente, considerando dentro de su formulación la implementación de esquemas organizacionales para su administración y operación.
- En la etapa 5 se promueven el desarrollo y la aplicación de tecnologías de potabilización apropiadas de bajo costo respecto a su implementación y mantenimiento, proponiendo al formulador reevaluar la forma como se han desarrollado este tipo de pro-

yectos, a través de acueductos convencionales que no han sido efectivos para solucionar la necesidad de contar con agua apta para el consumo.

- Por último, en la etapa 6 se esquematiza el acompañamiento o asistencia técnica permanente de manera paralela a lo largo de la formulación del sistema, con el fin de empoderar a las comunidades de su mantenimiento y operación, pero siempre asistiéndolos administrativa y técnicamente.

REFERENCIAS

1. Normativa y legislación vigente (Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, Prosperidad para todos).
2. Rodríguez Díaz, H.A. (2008). *Estudios de impacto ambiental. Guía Metodológica*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
3. Resolución 1097 de 2000, RAS 2000.
4. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS, título J, Alternativas Tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural (2010).
5. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS, título F, Sistemas de Aseo Urbano (2000).
6. Resolución 1433 del 27 diciembre de 2004, “por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, y se adoptan otras determinaciones”.
7. Resolución 2145 e 2005, “por la cual se modifica parcialmente la Resolución 1433 de 2004 sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV”.
8. Decreto 1541 de 1978 (julio 28). Modificado por el Decreto Nacional 2858 de 1981, “por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto Ley 2811 de 1974: “De las aguas no marítimas” y parcialmente la Ley 23 de 1973”. Trata sobre concesiones de aguas subterráneas.
9. Guía para formulación del Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) para las entidades prestadoras del servicio de alcantarillado y sus actividades complementarias en las zonas urbanas y rurales. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). Bogotá, D.C., 2006.
10. Sistema de Información de Agua y Saneamiento Rural (Siasar) (Centroamérica).
11. Información sobre acciones y procesos institucionales para los pueblos indígenas de Colombia (2010). DNP, Dirección de Desarrollo Territorial Sostenible, Acción Social, Unión Europea, Cordepaz.
12. Arango, R. & Sánchez, E. (2008). *Los pueblos indígenas de Colombia*. Bogotá: DNP.
13. Apuntes sobre la consulta previa con grupos étnicos. Documento de trabajo interno. DNP, DDTS.
14. Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010. Estado comunitario: desarrollo para todos.
15. Bases del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, Prosperidad para todos.
16. Londoño, N. & Montoya, R. (s.f.). Línea estratégica de acción para la implementación de proyectos de abastecimiento de agua y saneamiento en comunidades indígenas, en el marco de los planes departamentales de agua.

17. Vargas, M.C. (s.f.). Diagnóstico y objetivos Grupos Étnicos. Conpes Rural.
18. Moreno Rodríguez, C. & Vergara González, O. (julio de 2005). Propuesta de lineamientos de política pública en agua y saneamiento para los pueblos indígenas de Colombia. Bogotá: Consultores OPS/OMS, Convenio GTZ-OPS/OMS.
19. Derecho de agua y derecho indígena. Hacia un reconocimiento estructural de la gestión indígena del agua en las legislaciones nacionales de los países andinos¹ - Ingo Gentes² (¹ Documento conceptual para el Programa Walir, Water Law and Indigenous Rights. Towards structural recognition of indigenous rights and water management rules in national legislation, con estudios en Perú, Bolivia, Ecuador, Chile y EE.UU., coordinado por la Universidad de Wageningen, Países Bajos, y las Naciones Unidas-Cepal, Santiago de Chile, 2001) (²PhD en Ciencias Políticas y Sociales, Magíster en Antropología de la Universidad Libre de Berlín. Se desempeña actualmente como docente en la Universidad Alberto Hurtado, Universidad de Chile. Es investigador de la Universidad de Wageningen/ Holanda y la Cepal y consultor de Samtac de la Asociación Mundial del Agua (GWP).
20. Diseño de filtro casero para tratamiento del agua de consumo humano en comunidades indígenas de Guatemala. Proceso de transferencia tecnológica Nicaragua - Guatemala - Ministerio de Salud Pública. República de Guatemala (2002).
21. Plataforma Europea de Innovación para el Suministro de Agua y Saneamiento (WSSTP, por su sigla en inglés).
22. Cidecalli (2017). Diseño de sistemas de captación de aguas lluvias.
23. López Moreno, J.I. (2008). *Estimación de pérdidas de agua por evaporación*. Universidad La Rioja.
24. FAO.org Parte A. Evapotranspiración de referencia (ET_o). Capítulo 2. Ecuación de FAO Penman - Monteith; capítulo 3. Datos meteorológicos.
25. FAO (2000). Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Experiencias en América Latina.
26. Guevara, M.E. (s.f.). Estructuras hidráulicas. Embalses.
27. Villamizar, C.A. (1989). *Diseño de presas de tierra para pequeños almacenamientos*. Himat.
28. Chow, V. T. (1988). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill, Inc.
29. Cruz Cárdenas, Y.S. (2008). Cosecha de agua, una práctica ancestral. Manejo sostenible de las praderas naturales.
30. Unidad de Apoyo Técnico en Saneamiento Básico Rural (2001). Guía de diseño para captación del agua de lluvia.
31. Guía para el acompañamiento social de los proyectos de infraestructura (octubre de 2008). Bogotá: Acción Social, gobierno de Colombia.
32. Cabrera Martínez, I. (2010). Sistemas fotovoltaicos para el bombeo de agua.
33. Lermas Arias, D.A. (s.f.). Filtros cerámicos, una alternativa de agua segura. Tesis de grado. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales, Maestría en Ecotecnología.

Entidades, instituciones, organizaciones y fundaciones consultadas

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).
 Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico (VASB).
 Instituto Colombiano de Bienestar Familiar (ICBF).
 Dirección de Etnias del Ministerio del Interior.
 Cruz Roja Colombiana.
 United Nations International Children's Emergency Fund (Fondo Internacional de Emergencia de las Naciones Unidas para la Infancia) (Unicef).
 Organización Mundial de la Salud (OMS).
 Organización Panamericana de la Salud (OPS).

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