

03  
Julio - septiembre de 2015



ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000.00

Tarifa postal reducida N.º 2015-107 4-72  
Servicios Postales Nacionales S.A.  
Vence 31 de diciembre de 2015 - ISSN 0121-5132

- ❑ Crecimiento desbalanceado y política industrial.
- ❑ Estimación de la potencia de señales como índice de información en el procesamiento biomédico.
- ❑ Equipos GPRS con cobertura universal.
- ❑ Evaluación de los beneficios de la captura de CO<sub>2</sub> para el tratamiento de agregados finos reciclados de concreto, como una estrategia para combatir el cambio climático.
- ❑ Redes de energía eléctrica inteligentes: perspectivas en los contextos nacional e internacional.
- ❑ Ensayos para valorar los agregados pétreos destinados a la construcción de los pavimentos asfálticos de las carreteras nacionales. Compendio para dummies.
- ❑ Entrevistas  
"Si hay un temblor, donde quiero estar es en un túnel"  
Tarcisio Celestino  
"Hay que pasar trabajos, pero vale la pena construir el metro"  
Gianfranco Perri

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

ingeniería

99

ESCUELA  
COLOMBIANA  
DE INGENIERÍA  
JULIO GARAVITO

## CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**PRESIDENTE** EDUARDO SILVA SÁNCHEZ

**VOCALES** MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ  
LUIS GUILLERMO AYCARDI BARRERO  
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI  
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ  
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS  
JUAN MANUEL LUNA GORDILLO  
(representante de los profesores)  
DIEGO MAURICIO PÉREZ BEJARANO  
(representante de los estudiantes)

**RECTOR** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS

**SECRETARIO** RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

## REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**DIRECTOR** JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

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

**DIRECCIÓN EDITORIAL** CRISTINA SALAZAR PERDOMO

**EDICIÓN** **DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN**  
JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA  
**CORRECCIÓN DE ESTILO**  
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](mailto:revista@escuelaing.edu.co)  
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

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



# Contenido

## 5 / EDITORIAL

### La alta calidad de la educación superior

*Alfonso Rodríguez Díaz*

## 7-28

### Crecimiento desbalanceado y política industrial

*Eduardo Sarmiento Palacio*

En la teoría del crecimiento se incurrió en dos graves errores. Primero, la fase de transición es un proceso corto. Segundo, el crecimiento tiende a ser determinado o dominado por la tecnología. De esta manera, el margen de maniobra sobre el crecimiento es casi inexistente.

## 29-35

### Estimación de la potencia de señales como índice de información en el procesamiento biomédico

*Javier Alberto Chaparro Preciado*

Uno de los objetivos del procesamiento de señales biomédicas es desarrollar métodos matemáticos que sean capaces de identificar información originada en los pacientes, con el fin de facilitar la labor médica en las etapas de diagnóstico y tratamiento clínico.

## 37-44

### Equipos GPRS con cobertura universal

*Hernán Paz Penagos - Johnny Alexander Arévalo López - Marco Ortiz*

En el mercado colombiano se presenta un alza en la demanda de equipos para rastreo de activos móviles. Por economía, la mejor propuesta en el mercado son los equipos GPRS, que usan la cobertura de la red celular para tal fin. No obstante, cuando estos activos móviles salen de su cobertura, la tecnología GPRS deja de transmitir la información.

## 45-58

### Evaluación de los beneficios de la captura de CO<sub>2</sub> para el tratamiento de agregados finos reciclados de concreto, como una estrategia para combatir el cambio climático

*María Molano Camargo - Nancy Torres Castellanos - Cindy Molano Camargo*

En este artículo se presentan los resultados experimentales de la evaluación a corto plazo de algunas propiedades físicas y de durabilidad de muestras de mortero elaboradas con agregados finos reciclados de concreto (AR), expuestos a carbonatación acelerada.

# Contenido

**59-65**

## **Redes de energía eléctrica inteligentes: perspectivas en los contextos nacional e internacional**

*Paula Ríos Reyes*

La transición del sector de la energía eléctrica a escala global está impulsada por diversos aspectos tecnológicos, económicos y medioambientales. En el ámbito tecnológico, el desarrollo rápido de tecnologías de las comunicaciones, el control y la información permiten llevar a cabo operaciones de tiempo real en las redes de transmisión y distribución de electricidad.

**67-82**

## **Ensayos para valorar los agregados pétreos destinados a la construcción de los pavimentos asfálticos de las carreteras nacionales. Compendio para *dummies***

*Fernando Sánchez Sabogal*

En este artículo se describe el propósito de los ensayos incluidos en las especificaciones generales de construcción de carreteras del Invías para valorar la calidad de los agregados pétreos destinados a la construcción de subbases y bases granulares y mezclas de concreto asfáltico.

**83 / ENTREVISTAS**

### **“Si hay un temblor, donde quiero estar es en un túnel”**

Tarcisio Celestino

### **“Hay que pasar trabajos, pero vale la pena construir el metro”**

Gianfranco Perri

**97 / ALCANCE Y POLÍTICAS**



# Editorial

## La alta calidad de la educación superior

**ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ**

Profesor titular de la Escuela.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co

Cada vez que se inicia una visita para obtener un registro calificado, la acreditación de un programa o una acreditación institucional, me surgen una serie de inquietudes relacionadas con los procedimientos, mecanismos y requisitos establecidos por el Estado para garantizar que la educación superior es de alta calidad.

Y es que para cumplir todos estos requisitos se necesita que el programa académico y la institución de educación superior acopien de manera permanente todas las evidencias documentales para que en una visita de dos o tres días unos pares académicos juzguen dichas pruebas y, con base en éstas, presenten un informe en el que den su veredicto final, el cual debe refrendar el Ministerio de Educación.

Pero estos procedimientos, en teoría simples, exigen cada vez más tiempo y recursos. Para llevar a cabo tales procesos se requiere también ocupar a profesores, investigadores y personal administrativo, razón por la cual el tiempo dedicado a ofrecer lo que exige una educación integral de alta calidad se reduce considerablemente. No se ha tenido en cuenta qué significa invertir este tiempo y estos recursos en la ejecución de dichos procesos y en el cumplimiento de tales requisitos, en lugar de invertirlos para ofrecer una mejor educación.

La preocupación es por la forma y no por el fondo. Una cosa es lo que se exige con la reglamentación y los documentos de sustento y otra muy distinta es el trabajo que se debe desarrollar para que la educación ofrecida sea efectiva y de alta calidad.

Si se observa con cuidado, da la impresión de que estos documentos se convierten en una lista de chequeo, pero en los procesos nunca se indaga si se dicta una buena clase a los estudiantes, si lo ofrecido corresponde al estado actual del conocimiento, si el profesor dedica el tiempo adecuado para conseguir este propósito y si los recursos disponibles son los apropiados para cumplir con estos fines. Resulta importante que en los documentos quede la evidencia de que la educación es por competencias y no si el estudiante efectivamente es capaz de utilizar los conocimientos adquiridos, así como también resulta importante la evidencia de la investigación mediante la participación masiva en congresos nacionales e internacionales, la presentación de artículos en revistas indexadas y la interacción con los denominados pares de la comunidad científica internacional.

Lamentablemente, nunca se cuestiona si este nuevo conocimiento es efectivo y útil para un país que, como el nuestro, necesita aportes significativos para su desarrollo por parte de la comunidad de profesores e investigadores. Se puede pensar que lo fundamental es hacer presencia en el extranjero porque nos pone en igualdad de condiciones con la denominada comunidad académica internacional, independientemente de dónde y cómo hay que obtener los recursos para mantener este estatus y si este trabajo de investigación tiene un retorno para nuestra sociedad. Que yo sepa, muy pocas investigaciones en Colombia —por no decir ninguna— producen recursos, por lo que cabe preguntarnos

cuáles deben ser la responsabilidad y la obligación de los investigadores y profesores como generadores de riqueza. Así, por ejemplo, uno de los puntos que causan más polémica en estos procesos de acreditación de la alta calidad está relacionado con la investigación: si está certificada por medio de los correspondientes artículos en revistas indexadas o los avales de Colciencias, tiene validez; de lo contrario, no.

En síntesis, no está claro cuál es el impacto efectivo de esta denominada y así evaluada educación de alta calidad, a pesar de las estadísticas que se presentan.

Con tan pocos recursos disponibles, es hora de que se piense con cuidado en cuáles serían las herramientas prácticas que se deberían utilizar para garantizar una educación de alta calidad, cuyos frutos los reciba efectivamente nuestra sociedad.



# Crecimiento desbalanceado y política industrial

**EDUARDO SARMIENTO PALACIO**

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

eduardo.sarmiento@escuelaing.edu.co

## INTRODUCCIÓN

En la teoría del crecimiento se incurrió en dos graves errores. Primero, la fase de transición es un proceso corto. Segundo, el crecimiento tiende a ser determinado o dominado por la tecnología. De esta manera, el margen de maniobra sobre el crecimiento es casi inexistente. Todo lo que hay que hacer es esperar a que la tecnología venga de afuera y eleve los niveles de educación de la población. A la larga, la economía tiende a un equilibrio estacionario en que el capital, los ingresos laborales y el producto nacional evolucionan al mismo ritmo. Lo más grave es que ese perfil es neutral en materia de crecimiento y no requiere mayor presencia del Estado para hacerlo equitativo, porque ambas propiedades tienden a darse en forma exógena.

Curiosamente, en este mundo dominado por la tecnología y la educación el sistema por sí solo tiende al máximo crecimiento y corrige las inequidades. El modelo de Lucas de crecimiento económico ofrece la ilustración más clara. El distinguido profesor de Chicago muestra que a largo plazo el crecimiento es determinado por el capital humano o, si se quiere, por la inversión en educación y salud. No reconoce que por la alta complementariedad el capital físico y el capital humano no pueden separarse. Así, los trabajadores más calificados requieren más capital para desarrollar

sus capacidades. El mayor fracaso está en los países que han hecho grandes avances en el capital humano sin sustento en el capital físico. A la larga, resultan en economías de baja productividad del trabajo y reducido crecimiento. La mejor medida de la asociación entre las dos variables está en la relación entre el ahorro y la productividad total de los factores (PTF). Los mayores niveles de la PTF se encuentran en los países con mayor crecimiento del producto y el ahorro.

Los modelos de crecimiento, y en particular su convergencia, desviaron la atención sobre los problemas centrales. En la creencia de que la incidencia del capital desaparece en quince años, llevó a imaginar que el crecimiento estaba en la educación y en la investigación tecnológica. En términos simples, no advirtieron los

---

**El mayor fracaso está en los países que han hecho grandes avances en el capital humano sin sustento en el capital físico. A la larga, resultan en economías de baja productividad del trabajo y reducido crecimiento.**

---

trabajos empíricos que mostraban que la PTF no explica más del 20 % del crecimiento de los países en desarrollo y más del 50 % del de los países desarrollados. Este resultado controvierde totalmente la teoría que muestra que a largo plazo la contribución del capital es nula.

El modelo fundamentado en el conocimiento y la educación es una ilusión. Tanto la tecnología como el conocimiento crecen lentamente, muy por debajo del ahorro y el capital. Estamos en un mundo en el que es más fácil expandir el capital que los elementos del conocimiento. El capital está expuesto a rentabilidades decrecientes, pero éstas son más que compensadas por su expansión. En contraste, la tecnología y el conocimiento tienen elevadas productividades que son contrarrestadas por su lenta expansión. Contrario a toda la nueva teoría del crecimiento, la fuerza dominante de expansión es el capital, no porque sea más productivo sino por su mayor capacidad de expansión.

La debilidad de la formulación de Solow se encuentra precisamente en que supone que la tasa de ahorro es constante. Si el capital, la tecnología y el trabajo se dan en forma exógena, el crecimiento del producto es determinado por la tendencia de la población y el avance tecnológico. Las autoridades económicas no tienen ninguna discrecionalidad sobre el crecimiento. Otra cosa muy distinta es cuando se reconoce que el hombre está en capacidad de definir la parte del ingreso que se consume y ahorra. En ese caso, el crecimiento económico pasa a ser determinado en buena medida por la política económica, bien por incentivos o por decisiones forzosas.

---

**El modelo fundamentado en el conocimiento y la educación es una ilusión. Tanto la tecnología como el conocimiento crecen lentamente, muy por debajo del ahorro y el capital. Estamos en un mundo en el que es más fácil expandir el capital que los elementos del conocimiento.**

---

El modelo de Solow parte de la igualdad macroeconómica; supone que la tasa de ahorro es constante y que el capital y el producto crecen al mismo ritmo, e igual al crecimiento de la población más el avance tecnológico (PTF) e independiente del ahorro. En los trabajos realizados entre 1982 y 2001 por Mankiw (1992), Romer, Barro, & Sala-i-Martin (1995), Klenow - Rodríguez (1997), Bernake (2001) se encuentra que el crecimiento económico está relacionado con el ahorro y que la PTF crece menos que el producto. Sin embargo, ninguno de ellos acepta que este resultado constituye una prueba en contra de la formulación y concepción de Solow. Pero por favor. En términos simples, el sistema no tiende a un estado en el cual el crecimiento es independiente del ahorro e igual a la PTF más el aumento de la población. Sin duda, se trata de una clara evidencia de que el modelo de tasa de ahorro constante y equilibrio no tiene verificación en la práctica y, más aún, corresponde a una solución ineficiente. Así se reconoce en el modelo de Koopmans (1965), que considera que el ahorro lo pueden regular el mercado o los agentes económicos. El modelo de Koopmans avanza al considerar variable el ahorro, pero no ofrece una nueva concepción porque mantiene el supuesto de equilibrio. Al final, llega al mismo resultado de Solow de que la solución óptima se presenta cuando el capital y el producto crecen al mismo ritmo.

La falla de Koopmans está en que la maximización del consumo a lo largo del tiempo resulta en múltiples soluciones de desequilibrio y escoge la del equilibrio sin compararlas. La trayectoria óptima corresponde al estado en que el consumo y el capital evolucionan paralelamente y cuando llegan al equilibrio estacionario crecen al mismo ritmo. En virtud de que el retorno del capital es mayor que el de la elasticidad de sustitución del consumo, cualquier solución de mayor ahorro y capitalización que la del equilibrio genera más producción y consumo.

El verdadero debate es entre el modelo de equilibrio balanceado sostenido, propiciado por Solow y sus seguidores, y consolidado en lo que se denomina la nueva teoría del crecimiento, liderada por Lucas y Romer y en general por la Universidad de Chicago. En este caso, las economías tienden a un crecimiento del producto independiente del ahorro y similar al crecimiento de la PTF. El sistema crece por debajo de sus posibilidades y da lugar a una participación del trabajo en el PIB constante. Por su parte, en el modelo de equilibrio des-



balanceado, el capital crece mucho más que el producto y éste más que la población y el avance tecnológico. La producción y el consumo alcanzan mayores valores absolutos y ritmos de crecimiento.

### TRAYECTORIA ÓPTIMA

En las concepciones neoclásicas se encuentra que el libre mercado y el equilibrio constituyen las soluciones más eficientes. La observación de la realidad revela un resultado distinto. Las economías que más se apartan de este equilibrio avanzan más rápidamente. Los casos más ilustrativos son el de Japón, los tigres asiáticos a finales del siglo XX y ahora de China, que alcanzaron tasas de crecimiento cercanas al 10 %, dentro de un marco de incrementos persistentes de la relación capital-producto del 4 %. Contrario a las visiones dominantes, el elevado crecimiento es la consecuencia del desbalance. Así las cosas, las economías emergentes que se apartan de las estructuras de las economías que van adelante registran mejores índices de progreso.

La historia revela grandes similitudes en las trayectorias de crecimiento. En un principio, los países operan con índices de crecimiento del capital mayores que los del producto y de éste mayor que el de la población más el avance tecnológico. Luego la relación capital-producto sube y las diferencias se acortan. En algunas economías el capital y el producto tienden a evolucionar al mismo ritmo y en otras persiste la diferencia.

El comportamiento descrito se puede encasillar dentro de las teorías dominantes de crecimiento. La mayoría de los procesos pueden descomponerse en una fase de transición y en otra fase de equilibrio estacionario. En la primera, el capital crece por encima del producto y éste por encima de la población más el avance tecnológico, en tanto que en la segunda tienden a evolucionar al mismo ritmo.

Todo esto se sintetiza en la función Cobb - Douglas con capital físico, capital humano y avance tecnológico. En virtud de que el capital humano y el físico son complementarios, la formulación se simplifica en términos de capital y avance tecnológico.

$$G(Y) - \frac{\partial + \beta}{1 - \partial - \beta} G\left(\frac{K}{Y}\right) + n + g; G\left(\frac{K}{Y}\right) = s \frac{Y}{K}$$



$G(Y)$  crecimiento de producto,  $G(K/Y)$  crecimiento de la relación capital-producto,  $n$  crecimiento de la población,  $g$  crecimiento de la productividad total de los factores (PTF) y  $s$  la tasa de ahorro.  $\partial + \beta$  es la participación del capital físico y el humano en el PIB.

En las versiones iniciales de Solow, luego consolidadas por Koopmans, predomina la concepción de sustitución y de alta respuesta a los precios. En consecuencia, se esperaba que en un principio la alta productividad del capital y la elevada tasa de interés hubieran disparado el ahorro y llevado el sistema en un plazo corto, doce años, al equilibrio estacionario. Sin embargo, en la realidad se encuentra que el ahorro es poco sensible a la tasa de interés. A las economías les toma más de 40 años llegar al equilibrio estacionario. La intervención en el ahorro aparece como el camino para acelerar el crecimiento.

Lo cierto es que se descubrió la falsa creencia de que la trayectoria más eficiente, que genera más producción y consumo, se da en la solución de mercado y equilibrio. En razón de que en la fase de transición la rentabilidad del capital es superior a la tasa intertemporal del consumo, o si se quiere la impaciencia de posponer el consumo, cualquier trayectoria de mayor crecimiento del capital que la de equilibrio redundará en más producción, es decir, es más eficiente. En otros términos, las trayectorias en que la relación capital-producto crece más rápidamente resultan en mayor nivel de crecimiento del consumo y la producción. Ergo, el crecimiento desbalanceado resulta en mayores tasas de crecimiento y mayor eficiencia.

Las dos visiones están representadas en la formulación algebraica. La primera se da cuando domina el capital y la segunda, la tecnología. Las ventajas de la tecnología residen en su permanencia, en tanto que las del capital se encuentran en su capacidad de expansión.

En las visiones dominantes de la nueva teoría del crecimiento se toma como representativo el progreso dominado por la tecnología. El margen de maniobra para elevar el crecimiento se reduce a la educación, el aprendizaje en el oficio y la incorporación tecnológica, que se sumarían en el residuo tecnológico PTF, que representa los factores distintos del capital y el trabajo. En esta aproximación, que dominó el pensamiento de los últimos 30 años, la educación y la innovación aparecen como los principales medios para impulsar el crecimiento. Como se vio anteriormente, parte de



la deficiencia de la visión reside en que desconoce su complementariedad con el capital. Precisamente, la educación y la innovación han evitado que el descenso de la productividad del capital sea más acentuado.

La verdad es que el diagnóstico de que el crecimiento es determinado exclusivamente por el conocimiento dejó a los países sin discrecionalidad. Sus medios de acción se reducen a la educación y a la incorporación tecnológica. En la práctica, no tienen más opciones que elevar el gasto en educación y abrir las economías para que las tecnologías vengan con las importaciones y la inversión extranjera.

La expresión algebraica descrita, a pesar de su simplicidad, tiene un carácter universal. En los países de menor desarrollo y emergentes dominaría el primer

término, en tanto que en los de mayor desarrollo lo haría el segundo. Las diferencias entre naciones estarían dadas por la brecha entre el crecimiento del capital y del producto. Cuanto menor la brecha, tanto más cerca del equilibrio estacionario estaría el país, y su crecimiento dependería cada vez más de la población más el avance tecnológico. Las enormes diferencias de crecimiento entre naciones dejarían de ser un misterio. Simplemente, el crecimiento de los países más avanzados lo dominaría el conocimiento y el de los restantes, el capital. Como el capital tiene una mayor capacidad de expansión que el conocimiento, los últimos avanzan más rápidamente. En otras palabras, los países emergentes crecen más rápido por permanecer en la zona de transición, que constituye un desarrollo desbalanceado. Esta es una evidencia del fuerte vínculo entre el desbalance y el crecimiento.

En equilibrio estacionario, las economías crecen a un ritmo igual al aumento de la población más el avance tecnológico, algo así como entre 2 y 2,5 %. Lo cierto es que los países en desarrollo aprendieron que se puede ir más lejos; en efecto, buscaron diferentes procedimientos para propiciar el ahorro y reducir la velocidad del crecimiento de la relación capital-producto. Así, consiguieron ventajas de crecimiento de dos puntos porcentuales con respecto al equilibrio estacionario.

El principal obstáculo está en la baja respuesta del ahorro a la tasa de interés. La tasa de ahorro se mantiene constante o aumenta levemente. En razón de que la relación capital-producto tiende a crecer en forma sistemática, la única manera de acelerar el crecimiento es con ahorro forzoso. Otra cosa es que el esfuerzo no haya tenido todas las dimensiones. En la formulación de Koopmans es claro que el crecimiento no es independiente de la productividad del capital. La elevación del retorno del capital incrementa el ahorro y el mayor ahorro aumenta la relación capital-producto. Se configura un círculo entre el crecimiento y la relación capital-producto ocasionada por el ahorro. Esta es la verdadera razón del aumento de la relación capital-producto y del retorno del capital por encima del crecimiento del producto nacional.

En este punto aparece claro el vínculo entre el crecimiento y la distribución. Los agentes establecen el retorno del capital por encima de la productividad para contrarrestar la caída y elevar las ganancias. El ahorro sube y el crecimiento aumenta, al tiempo que



la participación del capital en el producto desciende. El camino más expedito para hacer la tarea es bajar los salarios por debajo de la productividad del trabajo, o si se quiere, remunerar el trabajo de acuerdo con la PTF.

### TRAYECTORIA TÍPICA

En las teorías de crecimiento de alta sustitución se considera que el ahorro es altamente sensible a la tasa de interés y que la relación capital-producto sube con rapidez. Así, las economías avanzan con elevados niveles de ahorro y altos crecimientos del capital y el producto. Luego, el ahorro desciende velozmente, mientras que la relación capital-producto sube en forma rápida. En un plazo corto, menos de doce años, las economías llegan al equilibrio estacionario. El producto y el capital crecen a la misma tasa e igual al aumento de la población y de la PTF (productividad total de los factores).

La evolución de la economía mundial muestra un comportamiento distinto. A las economías les toma más de 40 años aproximarse al crecimiento estacionario. Esta es una evidencia de que la tasa de ahorro evoluciona lentamente y que la relación capital-producto aumenta en forma sistemática. Así lo confirman los análisis históricos de Barro y Sala-i-Martin (1995), que constituyen la mejor ilustración cuantitativa de las economías, ratificados por la información de los últimos 20 años. La trayectoria de crecimiento que más se asemeja a la realidad es aquella en que las tasas de ahorro son bajas y relativamente constantes y la elasticidad del capital es del orden de 0,65. Sólo en esas condiciones se puede esperar que la transición al equilibrio estacionario dure 50 años.

En el trabajo de Barro y Sala-i-Martin se comparan las trayectorias de los modelos de crecimiento con las observadas en la realidad. En general, se encuentra que en un principio el producto crece más que el empleo y menos que el capital. La relación capital-producto sube con lentitud y el ahorro aumenta levemente o se mantiene constante. En consecuencia, el crecimiento del producto y el capital descienden y la diferencia se reduce progresivamente, pero no en su totalidad. Aunque débiles, las acciones de los gobiernos para elevar el ahorro y sostener el crecimiento mantiene el sistema por fuera del equilibrio estacionario. Se configura el típico crecimiento moderadamente desbalanceado, que da lugar a mayores niveles de consumo e ingreso.

**La aritmética es simple. Si la tasa de ahorro fuera altamente sensible a la tasa de interés y la contribución del capital al producto fuera 0,35, la economía llegaría al crecimiento estacionario en quince años.**

La aritmética es simple. Si la tasa de ahorro fuera altamente sensible a la tasa de interés y la contribución del capital al producto fuera 0,35, la economía llegaría al crecimiento estacionario en quince años. Las cosas son muy distintas cuando la contribución del capital al producto es 0,65 y la tasa de ahorro es relativamente constante. En tal caso, se requieren más de 50 años para alcanzar el equilibrio estacionario.

La evidencia empírica muestra que a los países desarrollados les tomó 200 años aproximarse al equilibrio estacionario y a los asiáticos cerca de 40 años. El crecimiento económico se mueve dentro de una trayectoria de elevación de la relación capital-producto entre 1 y 1,5 %. La intervención del Estado para elevar la tasa de ahorro de 20 a 30 % permite mantener la diferencia entre el capital y el producto en 4 %. El producto nacional crecería cerca de 10 %. En fin, la trayectoria de la economía es determinada por la formulación algebraica anteriormente descrita. El proceso se inicia con tasas de crecimiento del producto menores que las del capital y mayores que el trabajo, y tasas de ahorro bajas y poco sensibles a la tasa de interés. La relación capital-producto sube, el capital crece más que el producto y la diferencia se acorta y al cabo de 50 años desaparece. El crecimiento pasa a ser determinado por el aumento de la población y el avance tecnológico. Si las autoridades oficiales intervienen la tasa de ahorro y la elevan, el capital crece más que el producto, la relación capital-producto sube y la economía opera durante más tiempo en la fase de transición. La trayectoria resulta en mayor consumo e ingreso. En consecuencia, la economía se mantiene durante más tiempo en la zona de transición, con mayores tasas de crecimiento del capital, el producto y el consumo. Se configura el típico crecimiento desbalanceado.

En los modelos de crecimiento de la generación keynesiana, como Harrod-Domar, Robinson y Pasi-netti, y en la segunda de alta sustitución, se describen

las trayectorias, pero no se comparan ni se evalúan sus ventajas. Ramsey resolvió el problema en 1927, pero no fue comprendido por la complejidad de los procedimientos matemáticos. Tan sólo se vino a apreciar en 1965, cuando Koopmans, basado en procedimientos más comprensibles, demostró la existencia de múltiples trayectorias que gobiernan la economía, pero sólo una de ellas cumple con el requisito de equilibrio estacionario. Lamentablemente, incurrió en el error de descartar las soluciones de desequilibrio sin examinar sus propiedades. La solución óptima corresponde a una trayectoria en que el consumo y el capital evolucionan paralelamente, y sus tasas de crecimiento tienden a igualarse. En razón de que la rentabilidad del capital es mayor que la tasa de sustitución del consumo en la zona de transición, cualquier solución que signifique un mayor ahorro y un mayor crecimiento del capital redundará en más producción y consumo.

Así, las economías pueden expresarse de manera estilizada en la formulación algebraica en que una parte del crecimiento obedece al desbalance entre el capital y el producto y la otra se debe a la población y el avance tecnológico. En cierta forma, se reconoce que todas las economías pasan por la zona de transición y las más desarrolladas se encuentran más cerca del equilibrio estacionario. En cualquier caso, la importancia y la magnitud de los dos efectos constituyen un problema empírico que, sin hacerlo explícito, ha sido analizado por diversos autores. En todos los estudios de contabilidad de las cuentas nacionales, como los de Klenow Rodríguez, la Cepal y Barro y Sala-i-Martin, se encuentra que la relación capital-producto crece más lentamente en los países de mayor desarrollo.

Lo cierto es que quedó al descubierto la falsa creencia de que la trayectoria más eficiente, que genera más producción y consumo, se da en la solución de mercado y equilibrio. Debido a que en la fase de transición la rentabilidad del capital es superior a la tasa intertemporal del consumo (o si se quiere, a la impaciencia de posponer el consumo), cualquier trayectoria de crecimiento del capital por encima de la del equilibrio redundará en mayor producción, es decir, es más eficiente. En otras palabras, las trayectorias en que la relación capital-producto crece más rápidamente resultan en mayor nivel y crecimiento del consumo y la producción. Así, el crecimiento desbalanceado genera mayores tasas de crecimiento y eficiencia.

## CRECIMIENTO DESBALANCEADO

La teoría del crecimiento ha sido dominada por visiones que consideran que las economías tienden a operar en equilibrio estacionario. Las principales variables económicas evolucionan paralelamente. Partiendo de la observación de que la relación capital-producto aumenta (la productividad media del capital disminuye), se concluye que en un plazo corto el capital y el producto crecen a la misma tasa, el ahorro se torna inefectivo y el crecimiento del producto es determinado por la población y el avance tecnológico. El margen de maniobra de los países para acelerar el crecimiento se reduce a abrir las economías para que los bienes se adquieran abaratados en el exterior, aumenten los niveles de educación y amplíen el contenido del conocimiento. Este fue el modelo que siguieron Europa y Estados Unidos durante dos siglos y se reprodujo en América Latina en los últimos 25 años. Los resultados están a la vista. Los primeros crecieron entre 2 y 3 % y los segundos cerca de 4 %.

La información histórica revela un comportamiento muy distinto. Las economías exitosas operan con crecimientos del capital por encima del producto. La economía mundial en su conjunto, al igual que las individuales, evolucionan con relaciones capital-producto ascendentes y crecimientos determinados tanto por el ahorro como por el avance tecnológico y la población. El crecimiento de la productividad del trabajo es mayor que la PTF y la diferencia se explica por el ahorro. De esta manera, se confirma que las economías no tienden al equilibrio estacionario. Por lo general, disponen de una relativa discrecionalidad para que el capital crezca por encima del producto y acelere el crecimiento. La elevación de la relación capital-producto es mucho más lenta de lo que predice la ortodoxia.

---

**Se confirma que las economías no tienden al equilibrio estacionario. Por lo general, disponen de una relativa discrecionalidad para que el capital crezca por encima del producto y acelere el crecimiento.**

---

Los resultados anteriores modifican radicalmente la concepción de Solow y de la nueva teoría del crecimiento que predicen que el crecimiento económico es determinado por la población y la PTF. Dentro de este perfil el producto nacional a largo plazo avanza a un modesto ritmo del 3 %. En cierta manera, se niega que el capital pueda crecer por encima del resto de factores y que su productividad descendiente se pueda regular con acciones para elevar el ahorro. Lo cierto es que el sostenimiento de tasas constantes de crecimiento del producto y de capital durante largo tiempo aparece como la forma más efectiva para impulsar el crecimiento.

El principal obstáculo del crecimiento impulsado por el ahorro es la ley de Say. La elevación del ahorro amplía la capacidad instalada y la demanda a cambio de reducir el consumo. A menos que la estructura productiva se oriente a la inversión y a los bienes transables, bien por conducto de las exportaciones o de la sustitución de importaciones, el sistema queda expuesto a un exceso de oferta de bienes de consumo sobre la demanda que adquiere la forma de un exceso de ahorro sobre la inversión. Así las cosas, el crecimiento impulsado por el ahorro forzoso requiere medidas complementarias para asegurar la demanda.

Es claro que el aumento de la relación capital-producto eleva el crecimiento económico a cambio de un deterioro de la distribución del ingreso. La participación del capital en el PIB se incrementa. La única forma de evitarlo es con un impuesto al capital que cierre la brecha entre la rentabilidad del capital y el crecimiento del producto.

Las consideraciones anteriores suministran un margen de crecimiento distinto del de la teoría dominante. En esta teoría, el conflicto entre el crecimiento y el ahorro con la distribución del ingreso se resuelve con un crecimiento balanceado y bajas tasas de ahorro y constancia de la relación capital-producto. El perfil se justifica por su neutralidad con respecto a la distribución del ingreso. Los ingresos provenientes del trabajo y la tecnología crecen igual que el producto y la participación del trabajo en el producto nacional se mantiene constante.

Las características del capital replantean las concepciones del crecimiento. Por ser el factor productivo de mayor capacidad de expansión, está expuesto a productividades decrecientes. Sólo cuando todos los factores crecen al mismo ritmo, las productividades

individuales se mantienen constantes o aumentan. No existe otra forma para moderar y mantener la caída de la productividad del capital que elevar el ahorro. Cuanto más se avance en esta tarea, tanto mayor el crecimiento del producto.

Durante mucho tiempo se consideró que había sólo un modelo de crecimiento. Los elementos centrales son la constancia del ahorro, las ventajas comparativas y la conformación de déficit financiados con inversión extranjera. El modelo resultó en bajo crecimiento, alta inestabilidad y deterioro de la distribución del ingreso. En el presente artículo se avanza en mostrar que el crecimiento desbalanceado genera mayores tasas de crecimiento. Sin embargo, no está exento de dificultades. Al mismo tiempo, se manifiesta en una reducción del consumo y en una baja de la productividad persistente del capital. En el primer caso, se puede presentar un incremento de la oferta de bienes de consumo con respecto a la demanda que termina en un exceso de ahorro. Por su parte, la caída de la productividad del capital induce a los agentes económicos a mantener los retornos del capital por encima de dicha productividad. Los antidotos son elementales. Es necesario compensar la reducción del consumo con la reorientación del perfil productivo hacia los bienes de inversión y los bienes transables. Por otro lado, habría que contrarrestar las acciones de los agentes económicos con un impuesto igual a la diferencia del retorno del capital y el crecimiento económico.

## LAS ECONOMÍAS ASIÁTICAS

La teoría de crecimiento balanceado ha llevado a la visión equivocada de que la principal fuente de elevación de la productividad de la economía es el avance tecnológico. Los países no disponen de mayor discrecionalidad para elevar el crecimiento. No pueden ir más allá de liberar el comercio y reevaluar el tipo de cambio, elevando la educación y facilitando la difusión tecnológica. El modelo se aplicó durante varios siglos en Estados Unidos y Europa, con los bien conocidos resultados. El producto nacional creció por debajo del 3 %. No menos decepcionante fue su aplicación en América Latina. En un marco de recursos naturales, las economías crecieron a tasas ligeramente mayores, pero con una alta inestabilidad y elevados índices de desigualdad. La excepción fueron los países milagro,



los tigres asiáticos, Japón y China, que propiciaron altos crecimientos, inducidos por la expansión del capital por encima del producto. La otra parte del resultado se explica por el alto ahorro del capital. Así, las economías lograron elevados crecimientos de la capacidad instalada, sostenida mediante la orientación de la producción a los bienes de inversión y a los bienes transables. El capital contribuye al crecimiento en más de cinco puntos porcentuales, más del doble que el avance tecnológico. Se alcanzaron expansiones anuales del capital de 15 %, con expansiones iguales de la demanda durante cuatro décadas. La razón del éxito no es difícil concretarla. Por un lado, los altos niveles de ahorro permitieron una ampliación espectacular de la oferta. Por otro lado, la orientación de la producción hacia los bienes transables para conformar superávits en cuenta corriente y hacia los bienes de inversión logró un aumento sostenido del mismo orden de la demanda durante décadas. Por lo demás, en razón de que el ahorro provenía del capital y la represión laboral fue menor que en el resto del mundo, las elevadas tasas de crecimiento se alcanzaron con una mejoría en términos relativos de la distribución del ingreso.

El buen suceso de estas economías estuvo principalmente en la creación de la demanda. La ampliación del capital, inducida por el ahorro, encontró compradores. La producción creció muy por encima del consumo. El problema de América Latina, por lo menos de algunos países, para reproducir el crecimiento asiático estuvo precisamente en la incapacidad de crear la demanda. Nunca lograron conformar los superávits en cuenta corriente, en parte por la falta de ahorro, ni orientar la producción hacia los bienes de capital por la debilidad del proceso de industrialización. El resultado fue la conformación de exceso de capacidad y la acumulación de inversiones improductivas y baja rentabilidad.

En realidad, las tasas de crecimiento de 10 % de las economías asiáticas fueron impulsadas por el elevado ahorro de los ingresos del capital y complementadas con una estructura productiva que permitieron orientarla hacia el sector externo y la producción de bienes de inversión. El menor consumo ocasionado por el aumento del ahorro se contrarrestó con un superávit en cuenta corriente y el incremento de la producción de los bienes de inversión. Por lo demás, el conflicto entre el ahorro y la distribución del ingreso se aligeró por el alto ahorro de las empresas. En realidad, no existe otro

modelo que haya dado mejores resultados en materia de crecimiento y equidad.

El modelo desbalanceado de los países asiáticos constituye una evidencia incontestable. Sin duda, con una elevada expansión del capital y una audaz estrategia de ampliación de la demanda consiguieron durante cuatro décadas crecimientos de 10 %, que controvertían toda la teoría del crecimiento balanceado que propendía a tasas de crecimiento menores de 3 % y a lo sumo de 4 %. Lo más sobresaliente es que el desempeño se consiguió con el menor retroceso de los índices de distribución del ingreso con respecto al resto del mundo.

En las formulaciones teóricas se encuentra que el crecimiento está dado por la expansión de la relación capital-producto y por la población más el avance tecnológico. Así mismo, se verifica históricamente que el primer efecto se presenta en mayor grado en las economías emergentes en desarrollo y el segundo en las economías desarrolladas. Las teorías de crecimiento balanceado han creado la falsa creencia de que la única fuente de crecimiento es la población y la tecnología y que la discrecionalidad de los países en desarrollo para inducirlo es reducida. El margen de maniobra se limita a propiciar la inversión extranjera, la educación y la difusión tecnológica. Los resultados han sido precarios y cada vez peores. La teoría de crecimiento desbalanceado abre un panorama más favorable y promisorio. Los países están en capacidad de crecer durante periodos largos por encima de 7 %.

## PARTICIPACIÓN DE CAPITAL EN EL PRODUCTO

Los países en su conjunto tienen discrecionalidad sobre el ahorro. En tal sentido, están en capacidad de mantener tasas de crecimiento sostenidas por encima del equilibrio estacionario. El gran interrogante está en la distribución del ingreso. La elevación de la relación capital-producto tendría que estar acompañada por rentabilidades del capital inferiores al crecimiento del producto para mantener la igualdad entre el retorno del capital y su productividad.

La explicación del deterioro de la distribución del ingreso proviene de la elevación de la relación capital-producto, pero no por un dictamen de la naturaleza, sino por la mayor capacidad de expansión del capital con respecto a los otros factores. En tales condiciones, la participación del capital en el producto sólo puede

disminuir o mantenerse constante si el retorno del capital es menor que el crecimiento del producto. Como se observa en Colombia, en los últimos 25 años, el resultado no se presenta porque los gobiernos y los líderes de capital acuden a los más diversos procedimientos para evitar la caída del retorno del capital. En ese caso, el crecimiento tiene como contraparte el deterioro de la equidad. La igualdad entre el retorno del capital y la productividad sólo se mantiene si el retorno baja y la elasticidad de sustitución es mucho mayor que uno. Ambos comportamientos son controvertidos por los hechos. De acuerdo con la información de la economía colombiana, el retorno del capital se mantiene aproximadamente constante, mientras que la evidencia general muestra que la elasticidad de sustitución es cercana a uno.

En los estudios sectoriales se encuentra que la elasticidad de sustitución es menor que uno, pero no mucho menos, y en los estudios agregados aparece muy inferior. La información sobre América Latina de los últimos años muestra que los países que tienen mayor participación de salarios en el PIB per cápita también tienen mayor participación de trabajo en el PIB. En fin, la información sectorial, agregada y comparada, revela una sustitución menor que uno, y en cualquier caso, no muy diferente. Los hallazgos obtenidos hace 40 años no han variado mayormente.

La explicación del retorno del capital por encima del crecimiento del producto no está en la elasticidad de sustitución ni en nada que se le parezca. Se encuentra, más bien, en la acción deliberada de los gobiernos y los inversionistas para establecer el retorno del capital por encima de la productividad. El procedimiento es bien conocido: se reduce a trasladar la baja de la productividad del capital al salario, remunerándolo por debajo de la productividad. El camino más expedito son los ajustes salariales iguales al aumento de la productividad total de los factores.

El efecto de la elevación de la relación capital-producto sobre el retorno del capital no está en la elasticidad de sustitución sino en la acción para evitar su descenso trasladándolo al salario. No hay otra explicación de la reducción de la participación del trabajo en el PIB.

La mejor ilustración está en Colombia, donde la PTF crece sistemáticamente cerca del salario. Si la productividad del capital desciende, al igual que el retorno efectivo, el salario correspondería a la productividad



del trabajo y aumentaría más que la PTF. Pues bien, la igualdad del salario y la PTF revela que las empresas no asumen la menor rentabilidad del capital sino que, por el contrario, las trasladan al salario, remunerándolo por debajo de su productividad.

En fin, el desarrollo desbalanceado eleva la oferta de la economía a cambio de reducir la demanda, mantener el descenso de la productividad del capital y aumentar la participación del capital en el producto. Las secuelas se pueden contrarrestar con un impuesto al capital igual a la diferencia entre el retorno del capital y el crecimiento económico más el aumento de la relación capital-producto. No es un impuesto contra la naturaleza sino contra la tendencia de colocar el retorno del capital por encima de la productividad. El resultado es concluyente. Los esfuerzos de los agentes económicos para aumentar las ganancias y acelerar el crecimiento dan lugar a una rentabilidad del capital por encima del crecimiento del producto que deteriora la distribución del ingreso y aumenta la participación del trabajo en el producto nacional.

## CRECIMIENTO Y DISTRIBUCIÓN

A lo largo del artículo queda al descubierto la enorme variación de la incidencia de los determinantes del crecimiento con las características de los países, y más, su relación con la distribución del ingreso. Las soluciones del crecimiento y la equidad son totalmente distintas. Así lo confirma la experiencia de los últimos cien años en América Latina, que aparece como la región más

rezagada en ambos frentes. Las políticas de crecimiento y distribución del ingreso que han seguido las directrices institucionales de Europa y Estados Unidos han resultado infructuosas. La razón es simple. El crecimiento se ha propiciado por medio del mercado y el gasto público en educación e investigación tecnológica. Por otra parte, la distribución del ingreso se ha basado en estructuras tributarias menos que proporcionales al ingreso. Tal como lo muestran la mayoría de los estudios económicos sobre la materia, el gasto en educación tiene un efecto muy incierto sobre el crecimiento, y el gasto en educación y tecnología no se difunde ni se absorbe por la falta de complejidad industrial y agrícola. Por otra parte, la estructura tributaria afecta primordialmente a la clase media; su incidencia sobre la mediana, que corresponde a la mayoría de la población, es decir, al 40 % más pobre, es marginal. Así las cosas, América Latina operó durante 25 años con un instrumental que no tiene mayor impacto sobre el crecimiento económico y el deterioro de la distribución del ingreso. La explicación está en las falencias de las causales del desarrollo económico. El mercado no conduce a la solución más eficiente. La política fiscal basada en tributos menos que proporcionales al ingreso no afecta mayormente la distribución del ingreso en los países de mediano desarrollo.

Piketty cayó en la misma trampa del modelo neoclásico que considera que el crecimiento lo determinan el mercado y la educación, y que la equidad y el crecimiento son separables. Se reforzó la falsa creencia de que el crecimiento y la equidad son problemas universales que se originan y se corrigen en la misma forma en todos los lugares. Lo más grave es que Piketty fue más lejos

al encontrar que la distribución del ingreso es causada por la tendencia descendente de la productividad y la elasticidad de sustitución mayor que 1. Como ambas variables son exógenas al sistema económico, o si se quiere dictámenes de la naturaleza, la distribución del ingreso sería inmune, inmodificable. El impuesto al capital para cerrar la brecha entre el retorno del capital y el crecimiento económico sería inefectivo, porque induciría a los agentes económicos a contrarrestarlo con un mayor retorno del capital.

Las cosas son distintas dentro de nuestro diagnóstico. El mercado no conduce a la solución óptima. El crecimiento y la equidad no son separables. La conciliación de las dos variables no puede hacerse con medidas aisladas. En su lugar, se plantea la necesidad de un modelo económico que relacione sus componentes con el crecimiento y la equidad y actúe sobre ellos para alcanzarlos en forma simultánea. En la práctica, se plantean acciones directas para alcanzar los propósitos e indirectas para contrarrestar los conflictos. Como en muchos aspectos los dos propósitos son opuestos, de hecho se requieren más instrumentos que propósitos.

Las soluciones se esclarecen cuando se parte de un diagnóstico. En los países emergentes y en desarrollo, el crecimiento es determinado principalmente por el ahorro. Las acciones para elevarlo en forma indiscriminada aumentan la relación capital-producto, impulsan el crecimiento económico y suben la participación del capital en el PIB, y por lo tanto, empeoran la distribución del ingreso. En el caso concreto de Colombia, las causas de la distribución del ingreso son la acción deliberada de los gobiernos y los agentes económicos para establecer el retorno del capital por encima de la productividad, el bajo ahorro del capital y la exclusión del 40 % más pobre. El establecimiento de un impuesto igual a la diferencia entre el retorno del capital y el crecimiento reduciría el ahorro y el crecimiento, y no evitaría que la diferencia reapareciera a un menor nivel de crecimiento. De hecho, como se verá más adelante, tendría que complementarse con una acción orientada a elevar el ahorro y el capital, así como movilizar los recursos tributarios al 40 % más pobre.

## INDUSTRIALIZACIÓN

El modelo de crecimiento balanceado está basado en tres pilares centrales. El crecimiento del producto es





independiente del ahorro y está dado por la suma del avance tecnológico y la población. El grado de maniobra para elevar el crecimiento se encuentra en la educación y la investigación científica y tecnológica. El perfil productivo más eficiente está representado por la canasta de mayor productividad relativa y resulta del mercado. La entrada libre de la inversión extranjera y el déficit en cuenta corriente ofrecen el mayor aporte del comercio internacional al ingreso nacional.

En contraste, está la propuesta de crecimiento desbalanceado, basado en tres pilares contrarios. El crecimiento del producto es determinado principalmente por el ahorro. La elevación del ahorro por procedimientos forzosos constituye el medio más poderoso para elevar el crecimiento. El perfil productivo más eficiente corresponde a la canasta de alta representación de bienes de mayor productividad absoluta y potencial de demanda, como sucede con la industria y la agricultura. El mayor aumento del comercio internacional se consigue con un superávit en cuenta corriente, propiciado por un tipo de cambio ligeramente subvaluado, y una estructura de aranceles y subsidios que le conceda un tratamiento distinto a la producción destinada a las exportaciones y al mercado interno.

El primer modelo corresponde a la organización aplicada en la mayoría de los países de América Latina y en mayor grado de los neoliberales, como Colombia, Chile, Perú y México. La entrada de capitales y la revaluación del tipo de cambio determinan la ampliación del ahorro externo e inducen un crecimiento del capital por encima de la producción. Al mismo tiempo, el abaratamiento de las importaciones ocasiona el alza de los ingresos del trabajo y en mayor grado los del capital. El capital físico crece más que el producto y éste más que el avance tecnológico y la población. En el fondo, la dinámica es inducida por la revaluación y la entrada a la inversión extranjera, que no pueden sostenerse indefinidamente. En algún momento la revaluación se convierte en devaluación, que reduce los ingresos del trabajo y el capital y detiene la entrada de inversión extranjera, dejando al descubierto el déficit en cuenta corriente. Se origina una deficiencia de demanda efectiva que precipita la caída del producto nacional. La economía queda expuesta a una gran vulnerabilidad, que da lugar a crecientes dificultades cambiarias, financieras y recesivas. El balance está en la información de América Latina y Colombia en los últimos 20 años. Los países

---

**El mayor aumento del comercio internacional se consigue con un superávit en cuenta corriente, propiciado por un tipo de cambio ligeramente subvaluado, y una estructura de aranceles y subsidios que le conceda un tratamiento distinto a la producción destinada a las exportaciones y al mercado interno.**

---

de la región crecieron por debajo de las tendencias históricas y experimentan un deterioro sin precedentes en la distribución del ingreso. El balance no podía ser más infortunado. El aumento del capital inducido por la inversión extranjera no se utilizó en su totalidad. Las economías no elevaron el crecimiento y el empleo, y quedaron endeudadas y con ingresos del trabajo y el capital basados en el abaratamiento de las importaciones y el crédito, que son flor de un día.

El segundo modelo corresponde al aplicado en los países milagro, Japón, los tigres asiáticos y China. En general, se comprometieron en una represión salarial para elevar el ahorro forzoso que permite ampliar la capitalización y el superávit en cuenta corriente. Adicionalmente, siguieron políticas selectivas de protección y elevación de la productividad que colocan a la industria en primer lugar. El capital crece por encima de la producción y ésta crece más que la población, y el avance tecnológico y la demanda se mantienen con superávits en cuenta corriente y la orientación de la producción hacia los bienes de inversión. Así, el ahorro forzoso, la alta productividad de la industria y la competitividad externa resultan en crecimientos del producto cercanos al 10 % y del capital de 4 % por encima. Se configuró el milagro que se creía imposible dentro de las teorías de crecimiento balanceado.

En un caso, el modelo se asemeja al de los recursos naturales y en el otro al de la industrialización. De allí se concluye que la industrialización no es algo que surja aisladamente; mal podría imaginarse que resultara de un modelo de bajo ahorro, especialización en actividades de ventaja comparativa y déficits crecientes de balanza



de pagos. En el fondo, es un modelo de elevado ahorro que se inicia con bajos salarios y consumo, luego los incrementa a tasas de más del 5%, y bien puede quintuplicarlos en 25 años. Así, la economía de mediano ingreso que arranca con un ingreso per cápita de US\$5.000 en 25 años podría llegar a US\$25.000.

No es aventurado afirmar que la industrialización es la antítesis de la teoría neoclásica que ha dominado el pensamiento económico en los últimos 30 años. No es algo que surja de bajar unos aranceles y subir otros. Es la columna vertebral de la concepción económica que se aparta del fundamentalismo del mercado y parte de una estrategia global de elevación del ahorro, protección selectiva a los sectores de mayor productividad absoluta y conformación de superávits en cuenta corriente con tipos de cambio relativamente subvaluados. Adicionalmente, se requieren políticas laborales de salario mínimo y subsidios a la contratación de trabajadores del sector informal e impuestos al capital para evitar los efectos sobre los ingresos laborales.

---

**En los sectores industriales de mediana tecnología, el incremento de la experiencia acumulada redundará en una elevación de la productividad. Por cada punto de aumento de la producción acumulada, la productividad se incrementa en 20 % anual, y en los sectores de alta tecnología, como la computación, hasta en 30 %.**

---

La industria se caracteriza por los fuertes vínculos hacia adelante y hacia atrás. Los vínculos hacia adelante provienen de la alta complementariedad por el lado de la demanda con los servicios, el comercio y la agricultura. Por su parte, los vínculos hacia atrás se originan de las fuertes interrelaciones con la mayoría de los sectores económicos; no hay actividad que no le suministre insumos o materias primas a la industria.

Tal vez donde mejor se aprecia la característica integradora de la industria es en las importaciones de los países en desarrollo e incluso en los desarrollados. En

Colombia, en la actualidad las importaciones industriales superan el valor agregado. La caída de la industria en el producto nacional registrada en los últimos 30 años obedeció al crecimiento y predominio de las importaciones de materias primas y bienes de capital. En contraste, en China el alto valor agregado de la industria se explica por el acelerado proceso de sustitución de importaciones. De otra manera, sería imposible que el sector representara el 40 % del PIB.

Lo anterior le da una fisonomía especial a la industria con respecto al sector externo. El sector está en capacidad de expandirse por la vía de las exportaciones y la sustitución de importaciones. Por mucho tiempo se dio por sentado que el uno no podía hacerse con lo otro. La sustitución de importaciones implica la aplicación de aranceles que elevan los costos de la producción y sacan las empresas del mercado externo. Se equivocan. Las dos actividades se pueden conciliar con un tratamiento distinto a los sectores destinados al mercado interno y las exportaciones. Las primeras deben disponer de una protección adecuada para soportar la competencia internacional, mientras que las segundas deben operar con un tipo de cambio subvaluado que compense los mayores costos de la protección de los bienes de materias primas y bienes de capital. La armonización se consigue con un régimen cambiario que dé lugar a tipos de cambio distintos para las importaciones y las exportaciones.

La situación es especialmente crítica en los países dotados de recursos naturales. La industria está expuesta a grandes déficits comerciales. En Colombia, las importaciones más que duplican las exportaciones. Por lo demás, está expuesta a grandes revaluaciones que inducen a adquirir los bienes industriales y agrícolas en el exterior y grandes devaluaciones que bajan el salario real y no evitan el déficit en cuenta corriente ni sus efectos contractivos.

El otro aspecto es la productividad del capital. En general, se considera que la productividad del trabajo es menor en la industria que en la minería y la construcción. Las condiciones del capital son distintas. La relación capital-producto y la industria es muy inferior a la de la minería. De allí se concluye que la PTF es mayor en la industria que en cualquier otro sector.

La propiedad más sobresaliente de la industria es el aprendizaje en el oficio. En los sectores industriales de mediana tecnología, el incremento de la experiencia acu-

mulada redundante en una elevación de la productividad. Por cada punto de aumento de la producción acumulada, la productividad se incrementa en 20 % anual, y en los sectores de alta tecnología, como la computación, hasta en 30 %. Por lo demás, el sector tiene la mayor capacidad para absorber la investigación tecnológica, el factor más productivo de la economía. Adquieren carne y hueso las bien llamadas externalidades dinámicas de la industria, que incrementan su productividad y se trasladan a toda la economía.

Lo anterior se puede dimensionar. Debido a las exportaciones y a la sustitución de importaciones, la industria está en capacidad de crecer más que el promedio. ¿Qué tanto? La experiencia de China y los tigres asiáticos sugiere una diferencia del 4 %.

En síntesis, la industria está expuesta a externalidades e interrelaciones que hacen que su contribución al PIB sea muy superior a su participación en el producto. Si a esto se agrega que es el sector que crea más aprendizaje en el oficio y tiene más capacidad de absorber la tecnología, no hay otro sector que pueda tener el potencial de expansión de la industria. Como lo confirmaron los países milagro, el sector está en capacidad de crecer por encima del promedio.

### CONSEJOS DE COMPETITIVIDAD

Desde luego, las políticas industriales incurrieron en grandes errores. Sin embargo, las causas no estuvieron en las políticas propiamente dichas sino en las teorías que las sustentaron. La política industrial adquirió la forma de aranceles crecientes para aislar al sector de los peligros externos. Debido a las interrelaciones de la industria, el avance de la sustitución de importaciones y la protección aumentaban en la medida en que los sectores se tornaban más complejos. Los países terminaron con protecciones del 100 %, que elevaban los costos de exportación, reducían los salarios y configuraban cuantiosos déficits en cuenta corriente.

Los títulos de política industrial y de competitividad aparecen como los términos más citados y menos entendidos. A raíz de la moda de la apertura económica, en 1994 se suspendieron las políticas industriales y se sustituyeron por el Consejo Nacional de Competitividad, que desconocía sus propósitos y funciones. En el fondo, pretendían crear una estructura industrial para ampliar las exportaciones y competir en los mercados

internacionales. Lo cierto es que entre 1994 —cuando se crearon los consejos de competitividad— y 2014, es decir, más de 20 años, la institución no ha podido dar soluciones efectivas para la industria, y en su lugar ha sido causa de retroceso. En el fondo, han sido foros de protesta contra el Estado y presión para crear TLC, facilitar la inversión extranjera y desmontar las protecciones.

Los consejos de competitividad surgieron como una contraparte a las políticas industriales y como parte de la moda de las aperturas. Sus promotores no sabían siquiera el significado del vocablo. En términos empresariales, se habla de aumentos de competitividad cuando la productividad total de los factores se incrementa en relación con los costos para elevar las ganancias y la competencia con otras empresas. En el caso de los países, la competitividad se busca propiciando la expansión de las actividades que están en mejores condiciones de producir y exportar, y luego de convertirlas en divisas e importaciones. En el fondo, son mecanismos para maximizar la generación de divisas, en la creencia de que con éstas siempre es posible adquirir cualquier producto en el exterior. Por eso nunca hicieron nada para superar las limitaciones de la demanda, como por ejemplo aumentar la productividad. El resultado está a la vista. Al final, se configuró una estructura de comercio internacional en la que las importaciones crecen más rápidamente que las exportaciones y los mayores beneficios provienen del abaratamiento de las importaciones. Como contrapartida, se configuró una estructura productiva dominada por la minería y los servicios, con una PTF de crecimiento cercano a cero.

La política industrial se justificó como una forma de subsanar las falencias del mercado que impedían el aprovechamiento de las condiciones de la industria. Es necesario crear las condiciones para que la industria aproveche las ventajas dinámicas y contrarreste la presión del sector en favor de las actividades de ventaja comparativa y de baja productividad. Los esfuerzos deben orientarse a las actividades que tienen mejores condiciones de productividad absoluta y relativa. La tarea puede realizarse con la escalera tecnológica.

La política industrial sólo tiene sentido cuando se reconocen los atributos especiales de la industria con respecto a cualquier otro sector. Su principal papel es propiciar una expansión del sector por encima del producto, y para tal efecto debe comenzar por contrarrestar

los efectos negativos de los mercados sobre la industria y la agricultura.

La política industrial debe tener un alcance macroeconómico. La industria es el corazón del crecimiento desbalanceado y, por lo tanto, sus beneficios no se dan si el ahorro no se expande y el comercio internacional no se amplía. En tal sentido, la política industrial tiene que propender a una elevación forzosa del ahorro y a la conformación de superávit en cuenta corriente. En cierta forma, se plantea volver a las políticas del pasado, pero con una teoría validada por una experiencia de varias décadas y la reformulación de la teoría de comercio internacional. De ninguna manera se trata de establecer protecciones a rajatabla, sin tener en cuenta las repercusiones sobre el salario y las exportaciones. Precisamente, el avance consiste en reconocer que el comercio internacional tiene beneficios de demanda e intercambio, o más técnicamente, de productividades relativas y absolutas. El gran dilema es conciliar las actividades de mayor productividad absoluta y las de mayor productividad relativa. La tarea se puede hacer dentro del marco de una escalera tecnológica. El proceso se inicia con las actividades de mayor productividad relativa y termina con las de mayor productividad absoluta.

Tal vez la deficiencia más grande de la teoría está en la selección de los sectores. Según las teorías dominantes de Arrow y Debreu, así como de Heckscher-Ohlin-Samuelson (H-O-S), la contribución de todos los sectores es igual en el margen. Nadie mejor que el mercado puede saber que la productividad de un sector es más alta que la del otro. Ningún mortal está en posición de anticipar cuáles sectores incidirán más en el producto nacional y en el futuro. Este criterio, basado en la teoría estocástica de equilibrio general de la Universidad de Chicago, ha sido abiertamente controvertido por los hechos. De acuerdo con los estudios de Eugene Fama de hace 40 años, que predicen que los rendimientos de los activos financieros tienden a igualarse, el mercado es el único que está en capacidad de predecir el comportamiento de las cotizaciones. Pues bien, la información diaria muestra que los agentes económicos que consideran que el mercado opera en desequilibrio y da lugar a burbujas son los que mejor anticipan el comportamiento y ganan más que en las bolsas de valores.

La mejor ilustración de los últimos 20 años está en el perfil productivo de Colombia y América Latina, que prefirieron las actividades intensivas en recursos

naturales a la industria. Si el mercado es tan sabio, ¿por qué se equivocó más en los países que le dieron más juego a la competencia?

La otra causa grande estuvo en las teorías de ventaja comparativa de Ricardo y H-O-S. Ambas predecían que la solución más eficiente está en las actividades de mayor ventaja comparativa, en algunos casos por las actividades de mayor productividad relativa y en otros por la intensidad de los factores abundantes. La prioridad debe estar en los factores que generan más divisas. Como la industria y la agricultura son las actividades que menos contribuyen a ese resultado, quedaron relegadas al último lugar. Las economías se especializan en las actividades intensivas en recursos naturales y en los servicios. El consumo de bienes industriales y agrícolas se adquiere en el exterior, estructura que da lugar a una productividad de la canasta de producción inferior a la de la industria y la agricultura. Aún más grave, ocasiona grandes elevaciones de ingresos en las épocas de exuberancia y grandes caídas en las épocas de destorcida. Las economías terminan con grandes excesos de ahorro y déficits en cuenta corriente que las precipitan en recesión y crisis de balanza de pagos.

Así las cosas, ¿cómo podía surgir una política industrial dentro de semejante anarquía conceptual? Todo lo que se sabía era que la industria estaba expuesta a menores beneficios de intercambio que otros bienes y estaba asediada por la competencia internacional. Todo lo que había que hacer era establecer barreras arancelarias para que el sector pudiera programarse aisladamente del resto del mundo. Tomó 20 años observar que la barrera arancelaria significaba una protección creciente que disminuía las exportaciones, elevaba la inflación y reducía los salarios, y muchas veces terminaba en crisis cambiaria.

Los errores de la teoría también contribuyeron al fracaso de los consejos de competitividad. Para empezar, no contribuyó a aclarar el propósito de la política ni el significado del término. En la práctica, condujo a priorizar las actividades de ventaja comparativa y no hizo nada para aliviar las deficiencias de demanda. Se configuró una estructura productiva en que las importaciones crecían más rápidamente que las exportaciones y los salarios se sostenían con los precios de las *commodities* y la inversión extranjera. Aún más grave, relegó al último lugar a la industria y la agricultura, que son las actividades que más contribuyen al producto nacional y disponen de mayor demanda.



Los resultados están a la vista. La política de competitividad resultó en grandes elevaciones del ingreso por el intercambio a cambio de un perfil interno de productividad cercana a cero. No menos grave, configura una estructura comercial deficitaria, que introduce una gran inestabilidad y frena el crecimiento.

A la industria le fue mejor con la política industrial que con la de competitividad. Durante la primera, la producción industrial creció más que el producto interno bruto y su productividad corresponde a las dos terceras partes de la de Estados Unidos. En contraste, durante los consejos de competitividad la producción creció menos que el producto y la productividad con respecto a Estados Unidos se redujo a la mitad.

## NUEVA TEORÍA DEL COMERCIO INTERNACIONAL

En las teorías convencionales se supone que cada país se especializa y exporta en el bien de ventaja comparativa y adquiere el otro en los mercados internacionales. Ambos países adquieren el otro bien más barato en la nación socia y ambos ganan. El resultado no es cierto cuando los países tienen limitaciones de demanda en los bienes de ventaja comparativa o destinan una amplia parte de la canasta en bienes no transables. En este caso, los beneficios del comercio se reducen por la mayor productividad de los bienes transables en relación con

los no transables, como los servicios. En este sentido, el comercio internacional o la producción de bienes transables tiene un efecto intercambio por la mayor productividad de los bienes adquiridos en el exterior y un efecto demanda por la mayor productividad de los bienes transables con respecto a los servicios. Los beneficios del intercambio provienen del abaratamiento de las importaciones y los de demanda del aumento de la producción destinada a las exportaciones y a la sustitución de importaciones. En términos más técnicos, el uno proviene de las productividades relativas y el otro de las absolutas. Aquí está el meollo del problema. En la teoría de H-O-S se encuentra que los beneficios del comercio están en las productividades absolutas y en la de Ricardo en las productividades relativas. La primera dice que los países se deben especializar en los bienes de mayor productividad absoluta, como la industria y la agricultura, y las segundas en los de mayor productividad relativa, como los servicios y la minería. Ambas están equivocadas. Los países se deben especializar en los bienes que tengan la mejor combinación de productividad absoluta y relativa.

En este contexto, no es cierto que la solución óptima del comercio siga con las teorías dominantes del comercio internacional. La solución óptima corresponde a la canasta que redunde en la mejor combinación de las productividades absoluta y relativa. Si se tiene en cuenta que las diferencias de productividad dentro de países son mayores que las diferencias entre países, la solución más eficiente correspondería a un perfil dominado por los bienes de mayor productividad absoluta, como la industria y la agricultura. Sin embargo, en materia de productos no hay nada escrito. La producción de los bienes transables debe estar en los productos en que la diferencia de productividad entre el bien y los servicios es mayor que las diferencias de productividad con respecto al exterior.

Estamos ante una nueva teoría de comercio internacional, que se aparta de las convicciones dominantes en 200 años. La estructura sectorial más eficiente está representada por los productos transables que tienen la mejor combinación de productividades absoluta y relativa. Más aún, por los productos en que la diferencia de productividad con los servicios es mayor que la diferencia de productividades en relación con el resto del mundo (tabla 1).



**Tabla 1**  
Comercio internacional de tres sectores

	Confecciones	Servicios	Computadores
	Productividades		
Estados Unidos	4	1	8
Colombia	3	1	5

Supongamos por un momento que la diferencia entre la productividad de un bien y los servicios es mayor que la diferencia con respecto a la productividad en el exterior. La gente preferirá adquirir un bien en el exterior porque es más barato y le genera más divisas al país. Sin embargo, la solución es ineficiente. La elaboración del bien en el país genera más producción e ingreso del trabajo. En efecto, el mercado y la maximización de divisas no constituyen la solución más eficiente.

En un mundo de bienes transables y limitaciones de demanda que se parece más a la realidad, el libre comercio no conduce a la solución más eficiente. Bien puede ocurrir que los beneficios del intercambio sean inferiores a los de las diferencias de productividad absoluta entre los bienes transables y no transables. No hay ninguna automaticidad que asegure la deficiencia.

## TEORÍA DE LA POLÍTICA INDUSTRIAL

La política industrial es un medio para escoger los productos en que las diferencias de productividades absolutas internas son superiores a las diferencias con respecto a la productividad del exterior. En la práctica, se puede materializar con la escalera tecnológica. En un principio, se puede esperar que aparezcan los productos de mayor ventaja comparativa y menor productividad absoluta. Luego, en la medida en que avance el aprendizaje en el oficio, entrarán productos de menor ventaja comparativa, mayor diferencia de productividad con el resto del mundo y mayor productividad absoluta con respecto a los servicios. El proceso se repetirá con bienes de productividad relativa cada vez más baja y mayor productividad absoluta.

En ese contexto, el comercio internacional no será regido por H-O-S ni Ricardo, sino por la teoría antes descrita. El perfil productivo estaría dado por los bienes de mejor combinación de productividad absoluta y de productividad relativa. En la práctica, estarían representados por los productos en que la diferencia de

productividad de bienes transables con respecto a los servicios es mayor que la diferencia entre la productividad externa y la interna.

En *El modelo propio* se encuentra uno de los hallazgos más desconcertantes y constructivos del comercio internacional. En el caso de Colombia, que bien se puede extender a otros países de América Latina, las productividades relativas y las absolutas están inversamente relacionadas. Dicho en otros términos, los productos que el país está en condiciones de elaborar más fácilmente tienen productividades absolutas más bajas y menores posibilidades de demanda. Las condiciones son distintas en los países desarrollados; en éstos la productividad relativa de los bienes está directamente relacionada por la productividad absoluta, o si se quiere, los países están en condiciones relativas de producir más fácilmente los bienes complejos. Así las cosas, la especialización en los bienes de ventaja comparativa coincide con la especialización en los bienes de mayor productividad absoluta. Los postulados de Ricardo y H-O-S serían compatibles. En cambio, en los países en desarrollo está en abierto conflicto. El cumplimiento de una proposición está en conflicto con la otra.

Dentro de la nueva concepción teórica que se aparta de las tradicionales adquiere propiedad la política industrial. La solución óptima del comercio internacional no está en las ventajas comparativas ni en las relativas, sino en la combinación de éstas. Por lo demás, el resultado no proviene del mercado que les da abierta prioridad a las productividades relativas. Se encuentra en las actividades cuya diferencia de productividad con los servicios es mayor que la diferencia relativa con el exterior. El resultado sólo se puede lograr dentro de una presencia del Estado y protección orientada por la escalera tecnológica. Es indispensable un sistema escalonado de aranceles, en el cual la economía se especializa en los productos de ventaja comparativa y progresivamente pasa a otros de menor productividad relativa y mayor productividad absoluta. En efecto, en un principio la protección sería igual a la diferencia entre la productividad de los bienes transables y de los servicios. En la medida en que suba la productividad absoluta por el aprendizaje en el oficio y la investigación tecnológica y aumente la productividad relativa con el resto del mundo, la protección dejaría de ser necesaria y podría trasladarse a otros productos de menor productividad relativa y mayor complejidad. El ciclo avanzaría y se repetiría hasta cubrir la totalidad

del espectro industrial. En ese momento, la industria alcanzaría una alta participación en el PIB y las diferencias de productividades con los países desarrollados se acortarían. El milagro de la industrialización en países en desarrollo dejaría de ser un misterio.

En los países plenos en recursos naturales se conforman estructuras industriales altamente deficitarias. En Colombia, las importaciones más que duplican las exportaciones. El faltante se cubre con las divisas generadas por las *commodities* y la inversión extranjera. El sistema es altamente inestable dentro de un marco de cambio flotante. En las épocas de altos precios de las *commodities*, el tipo de cambio se revalúa excesivamente y en las épocas de baja de precios se revalúa en forma también excesiva. De hecho, se plantea la intervención en el mercado cambiario para regular el precio de la divisa y un tratamiento distinto tanto para las exportaciones industriales y agrícolas como para las importaciones.

## EXPERIENCIA COLOMBIANA

La evolución de la teoría se puede ilustrar con la experiencia de la economía colombiana de los últimos catorce años, cuando se le dio vía libre al comercio internacional. Se redujeron los aranceles, se dejó libre el tipo de cambio, se firmaron todo tipo de TLC y se facilitó la inversión extranjera. La economía quedó expuesta a un proceso en que los precios internos de los bienes transables se colocan por encima de los ex-

ternos. La economía se especializa en bienes de ventaja comparativa, en particular en minería y petróleo y en servicios, y adquiere la mayor parte de los bienes transables, es decir, de bienes industriales y agrícolas, en el exterior. El salario aumenta tanto por el abaratamiento de las importaciones (2 %) como por la baja de la productividad total de los factores (entre 0 y 0,5 %). Así, la economía tuvo un aumento de salario de 2,5 % anual durante quince años, tal vez el más alto en la historia del país. Sin embargo, el efecto de los dos componentes es muy distinto. El primero se da por una sola vez y el segundo es permanente.

El balance es lamentable. El salario creció durante quince años a 2 % por el intercambio anual, a cambio de un crecimiento de la productividad de la economía de cerca de cero. Si se tiene en cuenta que el primero se da por una sola vez, no es difícil concluir que la economía ha quedado condenada a un crecimiento de los ingresos de menos de 0,5 %, e incluso negativos, porque el efecto del abaratamiento de las importaciones desapareció. En suma, la libertad del comercio le dio a la economía una elevación de ingresos por el intercambio que se compensa en buena medida con el bajo crecimiento de la PTF. Si el liderazgo de la economía no hubiera estado en la minería y en los servicios sino en la industria y la agricultura, el crecimiento de la PTF habría sido de 2 %. La economía habría tenido un menor aumento de salarios en los últimos quince años, pero mucho mayor en los próximos quince años.

En el ejemplo histórico del comercio entre dos países en que cada uno se especializa en un bien distinto, los beneficios del intercambio se miden por el abaratamiento de las importaciones. El país exporta el producto con la mayor productividad relativa y con las divisas adquiere el de menor productividad relativa. Así, el comercio les significa a los agentes económicos una elevación en el salario relativo porque adquiere una parte de la canasta a un menor precio. Les permite adquirir las importaciones a un menor precio de lo que costaría elaborarlas internamente. Sin embargo, el resultado deja de ser cierto cuando el país adquiere el bien en el exterior y sustituye los bienes transables por no transables de menor productividad. En este contexto, los beneficios del comercio no estarían dados únicamente por el abaratamiento de las importaciones sino también por la diferencia de productividad de éstas con respecto a los bienes no transables. Así las cosas, en un

---

**En las épocas de altos precios de las *commodities* el tipo de cambio se revalúa excesivamente y en las épocas de baja de precios se revalúa en forma también excesiva. De hecho, se plantea la intervención en el mercado cambiario para regular el precio de la divisa y un tratamiento distinto tanto para las exportaciones industriales y agrícolas como para las importaciones.**

---

mundo de bienes no transables el efecto de intercambio es determinado por las productividades relativas y el efecto de demanda por las productividades absolutas. El primero se refleja en las importaciones y el segundo en las exportaciones.

Lo anterior modifica la visión tradicional del comercio internacional según la cual en el intercambio siempre se gana, o por lo menos no se pierde. Es posible que los beneficios del intercambio por un desmonte arancelario sean compensados por el efecto de demanda ocasionado por las mayores productividades absolutas de los bienes transables con respecto de los no transables. La importancia de los factores diferentes de los de intercambio en el comercio internacional se observó en los tigres asiáticos, en los cuales la expansión del comercio permitió mantener tasas de crecimiento cercanas a 10 % durante 40 años. Este incremento en el efecto de intercambio determinado por la reducción de aranceles, o si se quiere del abaratamiento de las importaciones, no es más que el aumento del crecimiento en dos años de las cuatro décadas del milagro. El impacto del comercio internacional sobre los ingresos está más en la mayor productividad de la canasta de bienes transables sobre los no transables que en el abaratamiento de las importaciones.

Ambos efectos se manifiestan en el ingreso del trabajo y del capital. El efecto intercambio proviene del incremento del ingreso proveniente del abaratamiento de las importaciones. Por su parte, el efecto de la demanda se encuentra en el aumento de la PTF. En los últimos diez años el primero estuvo representado en un aumento del salario real del 2 % anual y el segundo por un incremento de la PTF que fue cercano a cero. Existe, sin embargo, una diferencia grande entre los dos efectos: el efecto del abaratamiento de las importaciones es por una sola vez, en tanto que el de la demanda es permanente.

### ELEMENTOS CENTRALES DE LA POLÍTICA INDUSTRIAL

La gran ventaja de la vieja política industrial en la actualidad está en que las teorías dominantes de comercio internacional que la cuestionaban han sido controvertidas por los hechos. No es cierto que todos los bienes contribuyan a la productividad nacional igual en el margen y que los mercados sean el único medio de anticipar la mejor opción del futuro. En el mundo en que

los productos de ventaja comparativa son limitados por la demanda, la solución más eficiente se aproxima más a las actividades de mayor productividad absoluta y complejidad, como ocurre con la industria y la agricultura. La solución óptima no resultará del mercado. Se presenta, más bien, cuando se maximiza la suma ponderada de la productividad absoluta y relativa y corresponde a una escalera tecnológica en que la economía se inicia en las actividades de ventaja comparativa, que son las que están en mejores condiciones de realizar, y progresivamente se traslada a otras de menor productividad relativa y mayor productividad absoluta, hasta cubrir la totalidad del espectro industrial.

La industria es la actividad más integrada de la economía. Su desarrollo no puede ser excluyente. De hecho, está condicionado a una política industrial que



concilie los más variados aspectos, propicie el crecimiento desbalanceado y sustente altos niveles de ahorro y superávit en cuenta corriente. En primer lugar, se requiere implementar un sistema de elevados gravámenes progresivos que no afecten el ahorro, o que se complementen con dispositivos de orientación del crédito y regulación financiera que incrementen el ahorro del capital. En segundo término, hay que determinar los mecanismos claves de capitalización y demanda para que la industria avance por encima del promedio y la agricultura la siga de cerca. En tercera instancia, se debe adoptar una estrategia arancelaria y cambiaria orientada a conciliar el mercado interno con las exportaciones. Ante todo, se plantea un establecimiento de un sistema



escalonado de aranceles que propicie inicialmente los bienes de mayor productividad relativa y termine en los de mayor productividad absoluta y complejidad. Como complemento, habría que configurar un marco comercial y cambiario que les dé un tratamiento distinto a las exportaciones industriales y agrícolas y a las importaciones, y asegure un balance mínimo entre las ventas y las compras externas industriales. En cuarto lugar, hay que otorgar un subsidio a la contratación de trabajadores provenientes de la informalidad. Por último, se debe crear un programa de orientación del crédito para atender el desarrollo de las pequeñas y medianas industrias.

## CONCLUSIONES

Las teorías dominantes de crecimiento giran en torno al criterio de equilibrio. El mercado conduce a un estado en que el producto, el consumo, el capital y el trabajo crecen al mismo ritmo, y constituye la solución más eficiente. El resultado es sorprendente. En las economías que por razones de la naturaleza disponen de sectores con grandes diferencias y capacidad de expansión, el equilibrio significa la presencia de poderosas fuerzas que los alinean. La intuición sugiere un comportamiento distinto. La solución más eficiente debería estar en el desarrollo pleno de las actividades que tienen mayor potencial de expansión. El resultado estaría condicionado a acciones del Estado para detener las fuerzas del mercado.

La formulación más conocida es la visión del modelo de Solow, que presupone que el ahorro es constante. Las economías tienden a un estado en que el producto, el capital, el consumo y los ingresos laborales crecen al mismo ritmo. El crecimiento es igual al avance tecnológico y el aumento de la población, al tiempo que es independiente del ahorro. El resultado es controvertido por la evidencia empírica, que muestra que el crecimiento es determinado por las tres variables. Aún más importante, puede ser separado por un componente determinado por el capital y otro determinado por el avance tecnológico y el aumento de la población. El primer efecto predomina en las economías desarrolladas y el segundo, en las economías en desarrollo y emergentes.

En general, se encuentra que cuanto mayor el crecimiento del capital con respecto al producto, tanto mayor el crecimiento del producto nacional. Así, el

mercado no conduce a la solución óptima. La opción más eficiente resulta de la intervención del Estado para elevar el ahorro y mantener un crecimiento del capital por encima del producto. Este manejo no está exento de dificultades. Si el ahorro aumenta más que el producto, ¿quiénes van a adquirir la producción proveniente de la mayor capitalización? El potencial del crecimiento sería mayor que el consumo y se manifestaría en un exceso de oferta sobre la demanda. Simplemente, la producción tendría que orientarse a la exportación y a la sustitución de importaciones para conformar superávits en cuenta corriente y a la elaboración de bienes industriales de capital y materias primas. Por otro lado, el aumento de la relación capital-producto dentro de un marco de rentabilidad del capital mayor que el crecimiento amplía la participación del capital en el PIB y deteriora la distribución del ingreso.

El resultado controvierte los resultados aceptados de la teoría clásica. El mercado no conduce al máximo crecimiento y la distribución del ingreso y el crecimiento no son separables. La intervención del Estado para elevar el crecimiento y el consumo deteriora la distribución del ingreso.

Algo similar se plantea con respecto al comercio internacional. Los beneficios del comercio provienen del intercambio y de la demanda. Sin embargo, el mercado sólo refleja los primeros. Los estímulos de precios inducen a obtener el máximo beneficio de la diferencia de productividad con respecto a países socios. El resultado no garantiza el máximo ingreso cuando la mayor parte del consumo la representan los bienes no transables o los bienes de ventaja comparativa están expuestos a limitaciones de demanda. En tales condiciones, los mayores beneficios del comercio se dan cuando los países se inician en los bienes de ventaja comparativa, se trasladan progresivamente a otros de menor ventaja comparativa y terminan en los bienes de mayor productividad absoluta y complejidad. Adicionalmente, se requiere una modalidad comercial y cambiaria que asegure un balance entre las exportaciones y las importaciones industriales.

Lo anterior se confirma en la industria. Por tratarse de la actividad de mayor efecto de demanda y menor efecto de intercambio, y tener una alta inelasticidad de demanda, el mercado le da la última prioridad. La inconveniencia del criterio es verificada por la experiencia asiática, que logró altas tasas de crecimiento impulsa-



**La política industrial debe orientarse a crear las condiciones de complejidad, productividad, y armonía entre las exportaciones y la sustitución de importaciones para que la industria crezca por encima del producto nacional, al igual que las condiciones de protección a los cereales y aprovechamiento de las economías de escala y el avance tecnológico para que la agricultura no se quede atrás.**

das por la expansión de las actividades transables. En general, se encuentra que el efecto de intercambio no explica ni la décima parte de la elevación del crecimiento económico que se alcanzó durante las cuatro décadas del milagro. Por exclusión de materia, el resultado se explica en buena medida por el efecto de demanda, es decir, por la incidencia del aumento de las exportaciones y la sustitución de importaciones sobre el producto nacional.

El desarrollo industrial se ve obstaculizado en economías plenas de recursos naturales. Por definición, se configura una estructura industrial en que las exportaciones están representadas por los productos de mayor productividad relativa y menor complejidad, en tanto que lo contrario sucede con las importaciones. En virtud de que los productos complejos de mayor productividad absoluta tienen mayor demanda, las economías quedan expuestas a déficits cuantiosos de balanza de pagos que tienden a ser subsanados por los excedentes de divisas de las *commodities* y la inversión extranjera.

El crecimiento desbalanceado es la confluencia del ahorro, el comercio internacional y la industria, que constituyen las actividades de mayor potencial de expansión en la economía. En conjunto, están en condiciones de inducir crecimientos del capital y el consumo muy superiores al producto nacional, pero ninguna de estas áreas puede persistir por separado. La elevación del ahorro está condicionada a un perfil productivo que permita absorber la ampliación del capital y la producción. El superávit en cuenta corriente está supeditado a elevados niveles de ahorro. La industria no es posible sin la demanda que la sostenga.

Curiosamente, los tres pilares son debilitados por el mercado. El ahorro es muy poco sensible a la tasa de interés. El mercado induce la entrada de la inversión extranjera, que reduce el ahorro e induce a adquirir los bienes transables en el exterior. El mercado conduce a una especialización en actividades que pueden elaborarse más fácilmente en los países en desarrollo y que se caracterizan por baja demanda y reducida complejidad. La industria y la agricultura quedan relegadas a un segundo plano. El comercio internacional proviene del abaratamiento de las importaciones y los sectores líderes están representados por las actividades de baja productividad absoluta. En este contexto, es indispensable una política industrial que establezca las bases para que el sector avance por encima del promedio.

La industria no se da silvestre en los países en desarrollo, y menos en los dotados de recursos naturales. Los estímulos de mercado se inclinan en favor de las *commodities* y los servicios. El desarrollo tanto de la industria como de la agricultura no es posible sin una organización que frene los designios del mercado y establezca reglas en favor de los dos sectores. En la industria, como mínimo, se requiere una macroeconomía de elevado ahorro y superávit de la balanza de pagos. Al mismo tiempo, se plantea un sistema escalonado de aranceles que se inicien en las actividades que pueden elaborarse más fácilmente en el país, y en la medida en que se aprenda en el oficio, se trasladen a otras de mayor complejidad, y a una modalidad cambiaria y comercial que armonice las exportaciones y la sustitución de importaciones.

En el mismo orden de ideas, en la agricultura se requiere una abierta protección a los cereales que representan los productos de mayor demanda mundial y tienen menor productividad que en los países de clima templado. Pero ojo, el mayor desafío es la construcción de una empresa estatal que lidere los proyectos asociados en los cultivos expuestos a grandes economías de escala, como el maíz, la soya y el trigo, y dote al sector de una amplia infraestructura de caminos y riego.

En fin, la política industrial debe orientarse a crear las condiciones de complejidad, productividad y armonía entre las exportaciones y la sustitución de importaciones para que la industria crezca por encima del producto nacional, al igual que las condiciones de protección a los cereales y aprovechamiento de las economías de escala y el avance tecnológico para que la agricultura no se quede atrás.

La principal objeción al desarrollo desbalanceado es el efecto sobre la distribución del ingreso. Mal podría remediarse en un estado de equilibrio y bajo crecimiento. El dilema no se resuelve renunciando al crecimiento sino actuando para evitar sus efectos inequitativos. Es un problema de instrumentos y objetivos que puede resolverse con la metodología de modelos económicos. Al tratarse de objetivos relacionados con variables comunes, no basta operar de manera aislada; es necesario operar sobre diferentes frentes para alcanzarlos simultáneamente. La tarea adquiere forma cuando se dejan de lado las fórmulas universales y se parte de diagnósticos propios de las economías. La estrategia se ilustra con el caso colombiano. En el país, la desigual distribución del ingreso se origina en la acción deliberada de los gobiernos y los agentes para establecer el retorno del capital por encima de su rentabilidad, el bajo ahorro de los ingresos del capital, o si se quiere de las unidades productivas, y de la exclusión del 40 % más pobre.

La solución se presenta en el último capítulo del libro (Sarmiento, 2014). En términos generales, se plantea un sistema altamente progresivo con énfasis en el patrimonio y la progresividad del ingreso, para cerrar la brecha entre la rentabilidad del capital y el crecimiento, la orientación de los recursos para subir el ingreso del 40 % mediante un subsidio de medio salario mínimo para las compañías que amplíen la nómina con trabajadores provenientes de la informalidad, créditos tributarios para las empresas que aumenten el patrimonio basado en inversión y ahorro y amplíen las exportaciones, y fuertes sanciones para las personas que oculten los patrimonios.

El pobre desempeño de las economías más avanzadas ha llegado al clamor popularizado de que el crecimiento económico se acabó. En realidad, lo que se agotó es el crecimiento en equilibrio y con deterioro en la distribución del ingreso. Los modelos de Estados Unidos y Europa dan lugar a crecimientos ligeramente superiores a la población y sin avances en la inequidad. Por lo demás, las concepciones de libre mercado que los justificaron han sido seriamente desvirtuadas por los hechos y por la inconsistencia lógica. El mercado no conduce a un sistema de Pareto óptimo, y las políticas fiscales de gravámenes menos que proporcionales al ingreso y las educativas de elevar los niveles de escolaridad son ineficaces para reducir las desigualdades y en un mayor grado en los países en desarrollo.

En las nuevas concepciones de equilibrio se encuentra que el máximo crecimiento está condicionado a la intervención del Estado en el ahorro para sostener el máximo capital por encima del producto, conciliar los efectos de intercambio y demanda del comercio internacional y propiciar el liderazgo de la industria y la agricultura. Dentro de esta nueva visión, los países emergentes están en capacidad de sustituir a Estados Unidos y Europa como promotores del crecimiento, tal como efectivamente ocurrió en la última parte del siglo XX y parecía confirmarse en la primera parte del siglo XXI, pero a poco andar se vio frustrada. Hoy en día, los países emergentes de mayor proyección, como Rusia, Brasil, India y Suráfrica, aparecen como los más débiles del planeta. Parte de la explicación está en que nunca avanzaron en esquemas analíticos de desarrollo, como sí lo hicieron los tigres asiáticos, Japón y la China. En cierta forma, los nuevos países industrializados (NPI) no lograron apartarse de las visiones convencionales. Los esfuerzos no salieron del juego del mercado y del libre comercio; no avanzaron en una concepción de desequilibrio ni en las instituciones para mejorar la distribución del ingreso. Por el contrario, su manejo se asemeja cada vez más a las economías industrializadas avanzadas de Estados Unidos y Europa.

En síntesis, el mundo no ha logrado escapar del diagnóstico neoclásico. Persiste la creencia de que el mercado conduce a la máxima eficiencia, y que el crecimiento y la equidad son separables. De allí surge la premisa de dejar libre el mercado para obtener el máximo crecimiento y adoptar un sistema tributario menos que proporcional al ingreso para mejorar la distribución. El resultado ha sido insatisfactorio. Los países de América Latina crecen por debajo de sus posibilidades y están entre los más desiguales del mundo.

Las leyes del bienestar económico neoclásico parten de supuestos estilizados en los que los fenómenos dependen de pocas variables y se pueden regular con medidas comunes en todos los lugares. La realidad es muy distinta. Los determinantes del crecimiento varían con las características de los países, lo mismo que su relación con la equidad. La influencia del capital es mayor en los países en desarrollo y el de la tecnología en los países desarrollados. La dispersión del ingreso depende de las especificidades de los países. En las naciones desarrolladas la mediana se aproxima a la clase media, en tanto que las naciones en desarrollo corresponden

al 40 % más pobre; en unas las desigualdades se manifiestan en dispersiones generalizadas y en las otras en las diferencias entre los extremos y el promedio. La distribución del ingreso tiende a ser menos inequitativa en los países con altas tasas de ahorro.

La divergencia central con Piketty y la teoría neoclásica del bienestar se encuentra en la separabilidad entre la distribución del ingreso y el crecimiento económico y en la disparidad regular de los ingresos. No es posible reducir la complejidad de la distribución del ingreso a diagnósticos estilizados y soluciones universales. Estamos ante dos conceptos intrincados que dependen de variables comunes y muchas veces en la dirección opuesta. En este contexto, el problema se traslada a la formulación de un modelo que actúe sobre diversos instrumentos para armonizar el crecimiento y la distribución del ingreso.

El artículo se distancia de las visiones dominantes en tres aspectos centrales: el mercado no asegura la máxima eficiencia, el crecimiento y la distribución del ingreso no son separables y la dispersión de los ingresos no está dada por una distribución normal. El problema no puede reducirse a un diagnóstico estilizado y recetas universales. Mal puede esperarse que la solución provenga de la elevación de los niveles educativos y la ampliación de los recaudos tributarios. La solución no puede ser distinta de la de un modelo que incluya múltiples componentes y disponga de teorías comprensivas que los relacionen con los objetivos. Tal como se mostró anteriormente, el procedimiento se esclarece y adquiere forma práctica cuando se introducen el diagnóstico y las características propias del país. Sin ir lejos, en Colombia las causas de la distribución del ingreso son el retorno del capital por encima de la productividad, el bajo ahorro del capital y la exclusión del 40 % más pobre. La solución es un impuesto progresivo que cierre la diferencia entre el retorno del capital y el crecimiento económico, la elevación del ahorro del capital mediante estímulos y sanciones, y el establecimiento del subsidio de medio salario mínimo para las empresas que amplíen la nómina con trabajadores provenientes del sector informal.

## BIBLIOGRAFÍA

Atkinson, A.B. (2015). *Inequality: what can be done?* Harvard University Press Cambridge (Massachusetts), and London (England).

- Barro, R. & Sala-i-Martin, X. (1995). *Economic growth*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Bernanke, B.S, & Gürkaynak, R.S. (2001). Is growth exogenous? Tanking Mankiw, Romer and Weil seriously. *INNBR Macroeconomics Annual*, 16.
- Domar, E. (1976). Capital expansion, rate of growth, and employment. *Econometrical*, 14 (abril).
- Fama, E & French, K. (1992). The cross section of expected stock returns. *Journal of Finance*, 47.
- Harrod, R.F. (1942). *Toward a dynamic economics: some recent development of economic theory and their application to policy*, London: Macmillan.
- Helpman, E. (2004). *The mystery of economics growth*. Harvard University Press. Cambridge (Massachusetts), and London (England).
- Kaldor, N. (1963). *Capital accumulation and economic growth*. In Friedrich A. Lutz and Douglas C. Hague (eds.). *Proceeding of a conference held by the International Economics Association*. London: Macmillan.
- Klenow, P. & Rodríguez, A. (1997). The neoclassical revival in growth economics: has it gone too far? *NBER Macroeconomics Annual*, 12.
- 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>.
- Kuznets, S. (1955). Economics growth and income inequality. *American Economic Review*, 45, 1-28.
- Loaiza, Fajnzilber & Calderón (2004). *Crecimiento económico en América Latina y el Caribe*. Cepal.
- Lucas, R. (1998). The mechanics of economic development. *Journal Monetary Economic*, 22.
- Lucas, R. (2002). *Lectures on economic growth*. Cambridge: Harvard University Press.
- Mankiw, N.G., Romer, D. & Weil, D. (1992). A contribution to the empirics of economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, 107(2), 407-437.
- Pasinetty, L.L. (1977). *Lectures on the theory of production*. London: Macmillan; New York: Columbia University Press.
- Piketty, T. (2014). *Capital in the twenty-first century*. Cambridge: Harvard University Press.
- Robinson, J. (1953). The production function and the theory of capital. *Review of Economics Studies*, 21 (12).
- Romer, P.M. (1986). Increasing returns and long run growth. *Journal of Political Economy*, 94 (October).
- Sarmiento, E. (2002). *El modelo propio*. Bogotá, D.C.: Grupo Editorial Norma - Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sarmiento, E. (2011). *Transformación productiva y equidad*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sarmiento, E. (2014). *Distribución del ingreso con crecimiento es posible*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Shiller, R. (2000). *Irrational exuberance*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Solow, R. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *Quarterly Journal of Economics* 70 (february): 65-94. Reprinted in Stiglitz and Usawa (1969).
- Taylor, L. (2010). *Maynard's revenge. The collapse of free market macroeconomics*. Cambridge y Londres: Harvard University Press.
- Uzawa, H. (1961). *On a two sector model of economics growth*: I, *Restud*, vol. 28, February.
- Young, A. (1928). Increasing returns and economic progress. *Economic Journal*, 38, 527-542.
- Young, A. (1995). The tyranny of numbers: confronting the statistical realities of the East Asian growth experience. *Quarterly Journal of Economics*, 641-680.

# Estimación de la potencia de señales como índice de información en el procesamiento biomédico

## Estimation of signal power as an information index in biomedical processing

JAVIER ALBERTO CHAPARRO PRECIADO

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

javier.chaparro@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/12/2014 Aceptado: 14/03/2015

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

### Resumen

Uno de los objetivos del procesamiento de señales biomédicas es desarrollar métodos matemáticos que sean capaces de identificar información originada en los pacientes, con el fin de facilitar la labor médica en las etapas de diagnóstico y tratamiento clínico. Actualmente, varios equipos médicos disponen de la capacidad de interpretación de las señales que registran; ejemplo de ello son los equipos de signos vitales y de cuidado intensivo (ventiladores mecánicos), y gracias a ese tipo de características, han sido recientemente denominados equipos *inteligentes*. Las bondades del procesamiento automático de patrones, como se acostumbra llamar a este tipo de métodos que otorgan tan particular característica, han motivado diversas investigaciones de nuevos métodos que aprovechen al máximo las señales multidimensionales provenientes del ser humano, con el objetivo de extraer y analizar la mayor cantidad de información sin la intervención del personal médico. En señales unidimensionales, como las respiratorias o cardíacas, la estimación de la energía y la potencia es una alternativa para identificar información relevante de sus sistemas de origen y lograr en algunos casos identificar y caracterizar estados fisiológicos.

En este artículo se expone un método nuevo de procesamiento que, basado en la potencia instantánea de la señal de flujo respiratorio, puede identificar estados clínicos de pacientes con ventilación mecánica invasiva para establecer el momento óptimo de iniciar la retirada del ventilador mecánico. Los resultados, después de utilizarlo como variable

en diferentes métodos de clasificación automática de patrones, fueron satisfactorios al lograr una precisión cercana al 90 % y con una alta sensibilidad (capacidad de dar positivos casos realmente enfermos) y especificidad (capacidad de dar negativos en casos sanos).

**Palabras claves:** señales, potencia, sistemas respiratorio, índice de extubación.

### Abstract

One of the goals of biomedical signal processing is to develop mathematical methods capable of identifying information in patients to facilitate medical work in the clinical diagnosis and treatment stages. Currently, various medical devices have the ability to interpret the signals recorded; examples of these are the vital signs and intensive care equipment (mechanical ventilators), thanks to such features, they have recently been termed smart devices. The benefits of automatic pattern processing, as customary to call such methods that have this particular feature, have motivated several studies of new methods to take complete advantage of multidimensional signals from human beings, in order to extract and analyze as much information as possible without the intervention of medical personnel. In one-dimensional signals, such as respiratory or cardiac, estimating the energy and power is an alternative to identify relevant information from their source systems and manage, in some cases, to identify and characterize physiological states.



In this paper a new method of processing, based on the instantaneous power of airflow signal, is exposed; it can identify clinical conditions of patients with invasive mechanical ventilation to establish the optimal time to initiate the ventilator withdrawal. The results, after using it as a variable in different methods of automatic pattern classification, were satisfactory achieving an accuracy approaching 90 % and high sensitivity (ability to identify sick positives) and specificity (ability to identify negatives in healthy cases).

**Keywords:** biomedical signals; power; respiratory system; rapid shallow breathing index.

## INTRODUCCIÓN

Con el procesamiento de señales biomédicas se busca, principalmente, establecer información relacionada con el estado en los sistemas biológicos para orientar la labor médica de diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Una de las dificultades que existen actualmente en el ambiente hospitalario es la identificación del momento óptimo de iniciar la retirada del soporte ventilatorio a pacientes que han tenido dificultades respiratorias y que están en unidades de cuidado intensivo (UCI). Si bien hay índices cuantitativos que orientan esta decisión médica, elaborados a partir de la fisiológica del paciente, su confiabilidad, relacionada sobre todo con su sensibilidad y especificidad, no supera actualmente el 90 % (1), (2), (3). Este hecho motiva el desarrollo de investigaciones tendientes a mejorar y automatizar el proceso de retirada del ventilador mecánico.

Las señales respiratorias son fundamentales para establecer la función respiratoria de las personas, motivo por el cual cumplen un papel fundamental en el diseño del índice propuesto en este artículo, cuyo objetivo principal es brindar información cuantitativa de la función respiratoria que pueda ser de uso médico. El índice permite identificar, antes de iniciar la retirada del ventilador, la probabilidad de obtener una extubación exitosa y evitar de esta forma el deterioro de la salud que ocasiona un procedimiento fallido. Con este propósito se propuso este nuevo índice, el cual estima información de la energía de la señal de flujo respiratorio, que se usa posteriormente para entrenar sistemas de reconocimiento automático de patrones de tipo regresión lineal (RL), discriminante lineal (DL), árboles clasificación y de regresión (ACR), clasificador Naïve-Bayes (CNB), y máquinas de soporte vectorial (MSV).

En el desarrollo y la prueba del método se utilizaron señales de flujo respiratorio provenientes de una base de datos que contiene señales de pacientes a quienes se les inició la maniobra de extubación mediante prueba de tubo en T. Tiene un total de 140 registros, divididos en 92 que tuvieron éxito en el procedimiento y 48 que fracasaron, por lo que se requirió su reintubación. La metodología utilizada en este trabajo distingue dos fases: la primera es la formulación del índice y la segunda que corresponde a su evaluación. En esta segunda se distinguen tres etapas: la identificación de los puntos de inicio y fin de ciclo respiratorio, la de estimación del índice para cada individuo de la base de datos, y finalmente, el entrenamiento de los clasificadores mencionados en el párrafo anterior. Los resultados mostraron una precisión del 90 %, una sensibilidad del 85 % y una especificidad del 89 % para el clasificador Naïve-Bayes (CNB).

## METODOLOGÍA

El diseño y la evaluación del índice se hicieron con el objetivo de maximizar las medidas de precisión ( $A_c$ ), sensibilidad ( $S_n$ ) y especificidad ( $S_p$ ) de los clasificadores a la hora de estimar un éxito o fracaso en la extubación. Estas medidas se obtuvieron a partir de la matriz de confusión que cada uno de estos métodos arrojó después de clasificar las señales de la base de datos y analizar si el resultado fue un verdadero positivo ( $t_p$ ), falso positivo ( $f_p$ ), verdadero negativo ( $t_n$ ), y falso negativo ( $f_n$ ) (4). Las medidas de evaluación de los clasificadores quedan de esta forma definidas como:

$$A_c = \frac{t_p + t_n}{t_p + f_p + t_n + f_n}, \quad S_n = \frac{t_p}{t_p + f_n}, \quad S_p = \frac{t_n}{t_n + f_p}$$

### Diseño del índice de potencia

Este trabajo tiene como elemento central la propuesta de un nuevo índice de información para ser utilizado como predictor en el proceso de extubación. En su cálculo se requiere identificar dos instantes de tiempo (cruce por cero y punto de inflexión), un parámetro (umbral de cruce por cero) y una variable (energía en el punto de inflexión) para cada ciclo de la señal de flujo respiratorio (figura 1). La explicación de cada uno de estos componentes es la siguiente:

- **Cruce por cero ( $t_z$ )**. Corresponde al instante de tiempo en que la señal de flujo que cruza por cero sea durante la fase de inspiración o espiración. La validación de este punto se hace verificando si la señal permanece por encima de cero por lo menos hasta que su valor cuadrático acumulado alcanza un valor de referencia establecido en 0,1 (5) (6).
- **Punto de inflexión de la señal después del cruce ( $t_i$ )**. Instante de tiempo que se obtiene a partir del momento en que la segunda derivada de la señal se hace cero. Este punto permite establecer un cambio en el esfuerzo inspiratorio del paciente.
- **Energía acumulada desde el cruce por cero hasta el punto de inflexión ( $T_{iz}$ )**. Esta variable corresponde a la energía de la señal de flujo respiratorio y se mide desde el instante del cruce por cero ( $t_z$ ), hasta el momento en que se identifica el primer punto de inflexión ( $t_i$ ) después de  $t_z$ . Esta diferencia de instantes de tiempo se denominó  $T_{iz} = t_z - t_i$ .

Teniendo en cuenta que la señal está en tiempo discreto, el cálculo del índice queda expresado por la ecuación (1):

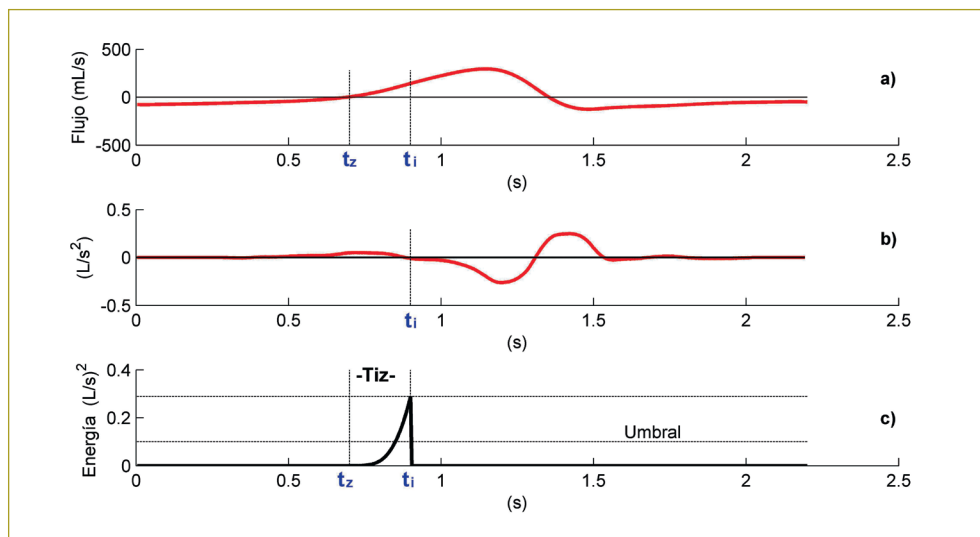
$$P_i = \frac{1}{T_{iz}} \sum_{t_z}^{t_i} x(t)^2 \quad (1)$$

### Evaluación del índice

Con el propósito de evaluar el desempeño del índice  $P_i$  en la estimación de un posible éxito o fracaso al iniciar el proceso de retirada del ventilador, se diseñó y evaluó un grupo de clasificadores cuyo propósito es predecir el éxito o fracaso al final de dicho proceso. Los clasificadores utilizados fueron de tipo regresión logística (RL), discriminante lineal (DL), arboles de regresión y clasificación (ARC), bayesiano tipo Naïve (NB), y máquinas de soporte vectorial (MSV). Para el entrenamiento y la validación se utilizó el método de *Crossvalidation-Leave One*, que permite dividir la base de datos en dos grupos; uno utilizado para el entrenamiento y el otro para la validación (7). El desempeño de cada clasificador se obtuvo estimando medidas de precisión ( $A_c$ ), sensibilidad ( $S_n$ ) y especificidad ( $S_p$ ). Para todos los clasificadores se establecieron dos clases para las cuales se entrenaron: éxito ( $C_e$ ) y fracaso ( $C_f$ ), y una sola variable predictora que es el índice  $P_i$ . A continuación se explican de forma resumida los fundamentos matemáticos de cada uno de los clasificadores.

### • Regresión lineal (LR)

Este método de clasificación es una aproximación a la predicción a partir de uno o más parámetros categóricos a través de una o varias variables predictoras. El modelo se especifica de acuerdo con la ecuación (2):



**Figura 1.** a) Segmento de señal de flujo respiratorio; b) derivada del segmento de señal; c) estimación de la energía acumulada de la señal desde el cruce por cero. En la figura  $t_z$  es el momento del cruce por cero, y  $t_i$  el instante donde se encuentra el punto de inflexión.

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n)}} \quad (2)$$

Siendo  $P$  la probabilidad de obtener un éxito ( $C_e$ ) o fracaso ( $C_f$ ) en función del grupo de variables predictoras  $x_i$ , los coeficientes  $\alpha_i$  son estimados mediante el método de máxima verosimilitud (8).

- **Discriminante lineal (DL)**

Este método busca una combinación lineal de parámetros que discrimine entre una o dos clases; en este trabajo sería entre las clases de éxito o fracaso, como se mencionó anteriormente. Su objetivo es maximizar y minimizar la variabilidad entre clases, para garantizar la máxima separabilidad (9). El método relaciona las variables predictoras  $x_i$  con las clases de la siguiente forma:

$$y = \mu_0 + \mu_i x_i \quad (3)$$

El valor de la variable  $y$  se relaciona con las clases de éxito o fracaso, de acuerdo con su signo; si ésta es positiva el clasificador supone un éxito ( $C_e$ ) en la extubación o de lo contrario supone un fracaso ( $C_f$ ).

- **Árbol de regresión y clasificación (ARC)**

El método CARC es una forma no paramétrica de segmentación binaria, donde el árbol se construye dividiendo repetidamente los datos. En cada división los datos son partidos en dos grupos mutuamente excluyentes. El nodo inicial es llamado nodo raíz y se divide en dos grupos hijos o nodos, luego el procedimiento de partición es aplicado a cada grupo hijo por separado. Las divisiones se seleccionan de modo que “la impureza” de los hijos sea menor que la del grupo madre y éstas están definidas por un valor de una variable explicativa (10).

- **Naïve-Bayes (NB)**

El funcionamiento de este clasificador probabilístico está basado en el teorema de Bayes aplicado a la clasificación supervisada de datos (11). Existen diversas variantes y se diferencia por las relaciones de dependencia entre las variable predictoras (12). El modelo supone independencia estadística de las variables predictoras  $x_i$

para las clases que hay que identificar y establece que el más probable diagnóstico *a posteriori*  $C_i$ , conocidos los síntomas  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , puede ser considerado como el estado de  $C_i$  con la mayor probabilidad *a posteriori*. El método busca explotar la probabilidad condicional de cada una de las clases de la forma que la clase seleccionada ( $c^*$ ) es aquella que es máxima la ecuación (4).

$$c^* = \arg \max_c P(C_i = c | x_1, \dots, x_n) \quad (4)$$

- **Máquinas de soporte vectorial (MSV)**

Este método de clasificación se basa en la transformación de las variables a un espacio dimensional mayor que convierte de esta forma un problema de clasificación complejo en otro más simple en un hiperplano *n-dimensional*. Para lograr este objetivo es necesario utilizar una función de kernel ( $K$ ) que permite definir la transformación no lineal que modifica el espacio de entrada, definido por el grupo de variables predictoras, en un espacio de mayor dimensión. Para entrenar el clasificador se utiliza un grupo de datos de las variables  $x_i$ , junto con sus clases  $C_i$ , para alguna dimensión  $d$  los  $x_i \in R_d$ , y los  $y_i = \pm 1$ . La ecuación (5) define el hiperplano de separación.

$$\langle w, x \rangle + b = 0 \quad (5)$$

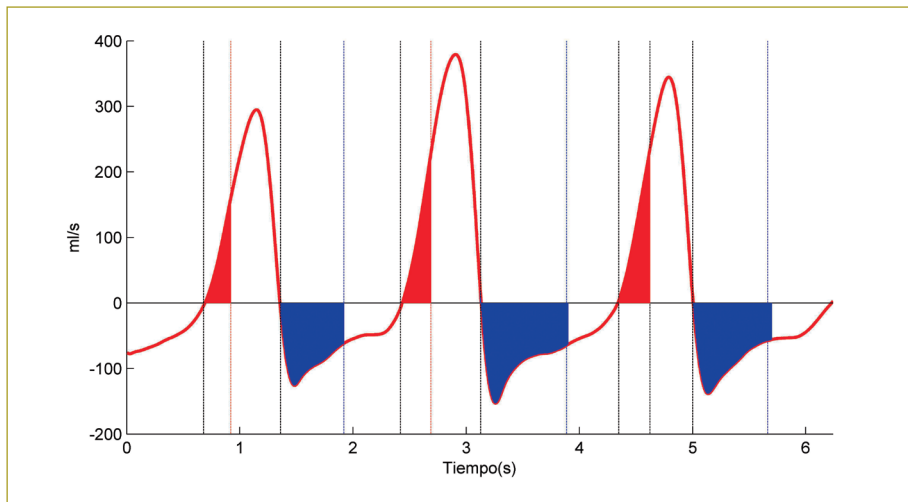
Donde  $w$  pertenece a  $R_d$ , y  $\langle w, x \rangle$  es el producto punto de  $w$  y  $x$ ,  $b$  es un real. Para definir el mejor hiperplano de separación se busca  $w$  y  $x$  de forma que se minimice  $\|w\|$  tal que para todos los datos  $(x_i, y_i)$  se cumpla la ecuación (6).

$$y_i (\langle w, x \rangle + b) \geq 1 \quad (6)$$

Los vectores de soporte son los puntos  $x_i$  en la vecindad, para los cuales  $y_i (\langle w, x_i \rangle + b) = 1$  (11), (14).

## RESULTADOS

Los resultados también se pueden ver de acuerdo con la metodología planteada en este documento; primero se observan los resultados de la estimación del índice en las señales de flujo respiratorio y posteriormente se analizan los resultados de los clasificadores automáticos



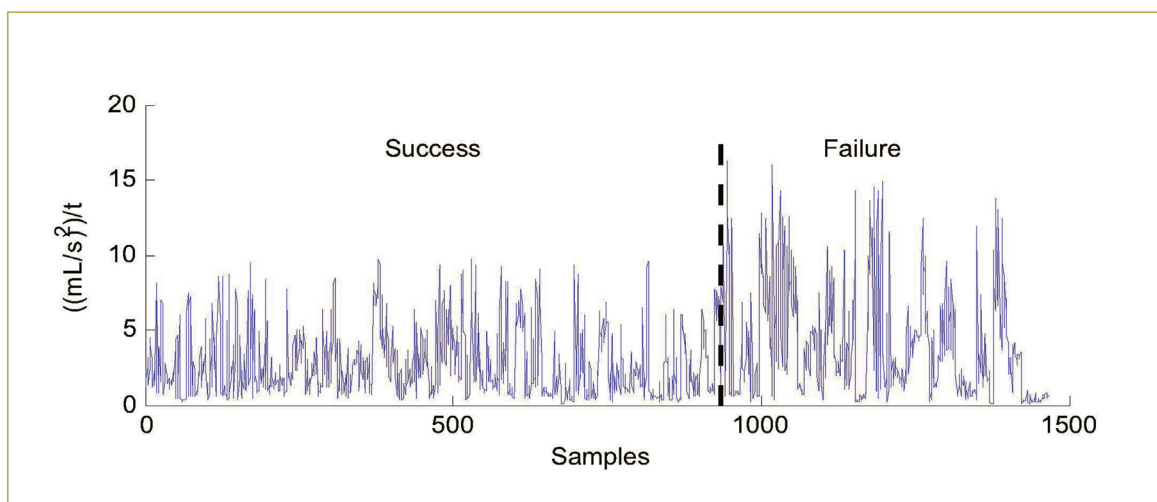
**Figura 2.** Los resultados se pueden distinguir de acuerdo a las dos etapas en que se desarrolló el trabajo. La primera es la de caracterización.

que se diseñaron. En la figura anterior se presenta un segmento de la señal de flujo, donde se marcan los lugares en los cuales se calculó el índice de potencia (figura 2).

Para utilizar el índice en el diseño y evaluación de los clasificadores fue necesario estimarlo en las 140 señales de la base de datos empleada en este trabajo. Sin embargo, con el propósito de evaluar el impacto de calcularlo durante los 30 minutos, tiempo que aproximadamente dura cada una de las señales, o en un intervalo de tiempo más pequeño, se analizó el desempeño de los métodos de clasificación con diferentes segmentos de duración

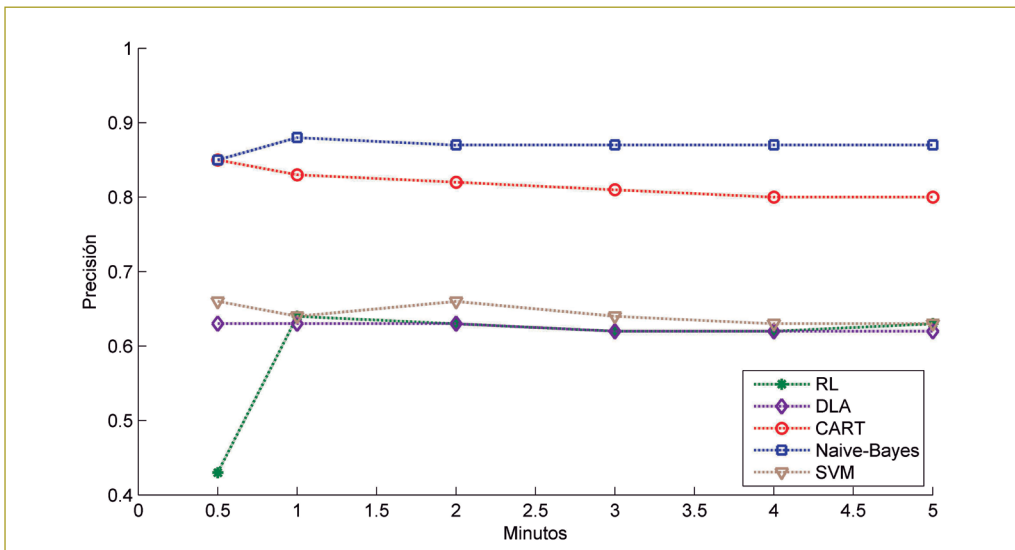
de las señales; 0,5, 1, 2, 3, 4 y 5 minutos. Se presenta, a modo de ejemplo, el resultado de calcular el índice con la información de la base de datos; se observa la tendencia de éste a ser de menor magnitud en el grupo de pacientes que finalmente se clasificaron como éxito en la extubación (figura 3).

La evaluación del índice se hizo al utilizarlo como variable predictora en el grupo de clasificadores ya mencionado. Los resultados para ventanas de tiempo de 0,5, 1, 2, 2,5, 3, 3,5, 4, 4,5 y 5 minutos, contadas desde el inicio de la retirada del ventilador, se pueden apreciar



**Figura 3.** Índice  $P_i$  estimado, correspondiente a un paciente del grupo éxito y otro del grupo fracaso.





**Figura 4.** Precisión obtenida en los clasificadores regresión lineal (RL), discriminante lineal (DL), árboles clasificación y de regresión (CART), clasificador Naive-Bayes (CNB), y máquinas de soporte vectorial (MSV) para longitudes diferentes de la señal de flujo respiratorio que utilizan el índice  $P_i$  como variable predictora.

observar en la figura siguiente (figura 4), en la que se observa que la mejor precisión se logró para el clasificador NB con una longitud de la señal de flujo 1 minuto.

Según la figura anterior, la precisión de todos los clasificadores es inestable para muestras de la señal menores de 1 minuto. De igual forma, se puede destacar que a partir de dos minutos se ve estable el desempeño de todos los clasificadores; esto puede ser indicador del comportamiento transitorio, que puede tener el sistema respiratorio justo después de iniciar la retirada del ventilador. La estabilidad del sistema se logra entre los minutos 1 y 2, según los resultados alcanzados.

Así mismo, se presentan las medidas de precisión, especificidad y sensibilidad calculada para todos los clasificadores y una duración de 1 minuto de la señal de flujo (tabla 1). Se observa que el mejor desempeño lo tiene el clasificador tipo Naive-Bayes (NB).

### CONCLUSIONES

Se propuso un índice inédito para el procesamiento de señales respiratorias que tiene como principio el cálculo de la potencia de la energía hasta el momento en que se detecta un cambio en su inflexión. El principio físico sobre el cual se formuló fue el de cuantificar la energía del paciente durante su esfuerzo espiratorio y limitarla hasta el momento en el cual este mismo esfuerzo es pasivo; es decir, no hay gasto voluntario de energía.

Se aplicó el índice a un grupo de señales de pacientes que iniciaron el proceso de extubación, se les retiró el ventilador y se registró el flujo respiratorio; los resultados muestran a primera vista una diferencia que después fue cuantificada por varios clasificadores, donde aparece de menor amplitud dicho índice en los pacientes que finalmente lograron un éxito en la retirada del ventilador. Se puede pensar que los pacientes que tienen

**Tabla 1**

Media y desviación estándar de las medidas de precisión (Acc), sensibilidad (Sn), y especificidad (Sp) obtenidas en la evaluación de los clasificadores LR, CART, NB y MSV, con señales de 1 minuto de longitud

Medida	Clasificador				
	RL	DL	ACR	NB	MSV
Acc	0,59+0,07	0,61+0,01	0,81+0,03	0,87+0,01	0,64+0,01
Sn	0,85+0,19	0,84+0,02	0,90+0,01	0,90+0,01	0,95+0,01
Sp	0,10+0,11	0,26+0,01	0,66+0,06	0,81+0,02	0,12+0,02

fracaso están asociados con esfuerzos mayores del sistema respiratorio al momento de retirar el soporte ventilatorio.

Con señales de longitud de 1 minuto, la mejor clasificación se obtuvo utilizando el clasificador de Naïve Bayes (87 %), con las mejores relaciones de sensibilidad (90 %) y especificidad (81 %). De acuerdo con estos resultados, las señales de 1 minuto podrían proporcionar información relevante acerca de la condición del paciente. Por lo tanto, una ventaja de este nuevo índice es su valor pronóstico con señales de flujo respiratorio corto. Clínicamente, los pacientes están tratados suponiendo que tienen capacidad para recuperar la respiración espontánea al momento de la prueba.

## BIBLIOGRAFÍA

1. McConville, J.F. & Kress, J. (2012). Weaning patients from the ventilator. *The New England Journal of Medicine*, vol. 367.
2. Weaning from mechanical ventilation (2007). J-M. Boles, J. Bion, A. Connors, M. Herridge, B. Marsh, C. Melot, R. Pearl, H. Silverman, M. Stanchina, A. Vieillard-Baron, T. Welte. 29, s.l. *European Respiratory Journal*, vol. 1.
3. *Performance of Respiratory Pattern Parameters in Classifiers for Predict Weaning Process* (2012). J. Chaparro, B. Giraldo, P. Caminal, S. Benito. Engineering in Medicine and Biology Society, IEMBS '12. 34th Annual International Conference of the IEEE.
4. *Beyond Accuracy, F-Score and ROC: A Family of Discriminant Measures for Performance Evaluation* (2006). Marina Sokolova, Nathalie Japkowicz, Stan Szpakowik. Hobart, Australia : 19th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence.
5. Caracterización de la señal de flujo respiratorio mediante la estimación de instantes de inicio y fin de inspiración tipo de producto (2008). Javier, Chaparro P. Bucaramanga : STSIVA 2008.
6. Power index of the inspiratory flow signal as a predictor of weaning in intensive care units (2014). J.A. Chaparro y otros. Chicago: Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC, 2011 Annual International Conference of the IEEE.
7. A survey of cross-validation procedures for model selection (2010). Sylvain, Arlo s.l.: *Statistics Survey*, vol. 4.
8. Brown, H. Tinsley and S. (2000). Handbook of applied multivariate statistics and mathematical modeling. s.l.: Academic Press.
9. Huberty, C. (1994). Applied Discriminant Analysis, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. s.l. : Wiley & Sons Inc.
10. Pineda, S. & Serna, C. (2009). Comparación de árboles de regresión y clasificación y regresión logística. Medellín: Univesidad de Antioquia.
11. Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G. & Smyth, P. (1996). From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. s.l.: *American Association for Artificial Intelligence*.
12. From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G. & Smyth, P. (2008). *American Association for Artificial Intelligence Magazine*, vol. 1.
13. Steinwart, I. & Christmann A. (2008). Super Vector Machine, Information Science and Statistics. s.l. Springer.
14. Patients on weaning trials classified with support vector machines (2010). Garde, A., Schroeder, R., Voss, A., Caminal, P., Benito, S. & Giraldo, B.F. s.l.: Physiological Measurement.

# Equipos GPRS con cobertura universal

## Universal coverage for GPRS devices

HERNÁN PAZ PENAGOS<sup>1</sup> - JOHNNY ALEXÁNDER ARÉVALO LÓPEZ<sup>2</sup> - MARCO ORTIZ<sup>3</sup>

1. Ph.D. en Educación y magíster en Telemática. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Director grupo de investigación. Ingeniería Electrónica.

2. Ingeniero electrónico. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Ingeniero coinvestigador. Ingeniería Electrónica.

3. Ingeniero electrónico. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Ingeniero coinvestigador. Ingeniería Electrónica.

hpazster@gmail.com - colciencias.alexander@escuelaing.edu.co - colciencias.marco@escuelaing.edu.co

Recibido: 12/03/2015 Aceptado: 10/05/2015

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

### Resumen

En el mercado colombiano se presenta un alza en la demanda de equipos para rastreo de activos móviles. Por economía, la mejor propuesta en el mercado son los equipos GPRS, que usan la cobertura de la red celular para tal fin. No obstante, cuando estos activos móviles salen de su cobertura, la tecnología GPRS deja de transmitir la información. El dispositivo OSP/Satelital desarrollado, reusa equipos GPRS o también llamadas unidades de localización vehicular automática: AVL, específicamente TT8750+ de Skypatrol y Syrus de DCT, que son utilizadas para localización y seguimiento de activos móviles con cobertura celular, y les agrega un canal de respaldo satelital mediante el módem STX2 de Globalstar®, para garantizar continuidad en la comunicación en cualquier zona geográfica de Colombia. De manera automática se activa o desactiva el dispositivo OSP/Satelital, de acuerdo con la ausencia o no de cobertura GPRS. Este producto tecnológico que integra *hardware*, interfaces de comunicaciones y *software*, fue el resultado de un proyecto de investigación desarrollado por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito en conjunto con la empresa OSP Ltda., con la financiación de Colciencias.

**Palabras claves:** activos móviles, dispositivo satelital, localización, seguimiento, tecnología GPRS.

### Abstract

The Colombian market has seen a rise in the demand for tracking equipment for mobile assets. Budget-wise, the best available offers are GPRS devices, which use cellular network coverage for that purpose. Nevertheless, when mobile assets leave the network coverage area, GPRS technology stops transmitting information. The OSP/Satellital device developed reuses GPRS devices, also known as automatic vehicle location systems (AVL), especially Skypatrol's TT8750+ and DCT's Syrus, used for tracking and locating mobile assets within the cellular coverage area, and a satellital back-up channel added through Globalstar's® STX2 to guarantee communication continuity in any geographical zone of Colombia. Automatically activated, the OSP/Satellital device works accordingly to the presence or absence of GPRS network coverage. This technological project that integrates hardware, communication interfaces, and software was the result of a joint research project developed by Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito and OSP Ltd. with the financing of Colciencias.

**Keywords:** mobile assets; satellital device; location; tracking; GPRS technology.

## INTRODUCCIÓN

El foco de la investigación “Desarrollo de una solución tecnológica inalámbrica (GPRS/GPS) para la localización y seguimientos de activos móviles que sea compatible con equipos GPRS ya existentes”, de la convocatoria 562 de Colciencias, era el diseño e implementación de un canal de respaldo satelital. En esta perspectiva, fue indispensable usar el módem STX2 de Globalstar®, al igual que diseñar y construir el *hardware*, las interfaces y el *software* necesarios para comunicar los equipos GPRS con el módem. De este modo, se garantizó la cobertura celular y satelital deseada para la localización y el rastreo de activos móviles en Colombia. La resolución del problema planteado integró *hardware* y *software* de comunicaciones, y estuvo alineada con la necesidad tecnológica detectada en el mercado por la empresa beneficiaria: OSP Ltda. Para la ejecución del proyecto sumaron esfuerzos la empresa privada, el Estado (Colciencias) y la academia (grupo de investigación ECITrónica), mediante una alianza estratégica. Entre los resultados del proyecto se destacan la generación de nuevo conocimiento sobre interfaces de comunicación GPRS-módem satelital STX2, el fortalecimiento de la capacidad investigativa del grupo de investigación involucrado, y el mejoramiento en la oferta de servicios inalámbricos para seguimiento de activos móviles mediante una solución versátil, económica y de bajo consumo.

## DISPOSITIVO OSP/SATELITAL

Inicialmente, los datos recibidos del módulo externo de sensores o equipos GPRS se almacenan en un *buffer* del microcontrolador (Zhao et al., 2009). Allí son procesados y luego enviados por su interfaz serial al módulo satelital, para propagarlos por transmisión satelital mediante el uso del módem satelital STX2. Este proceso se muestra en detalle en la siguiente figura (figura 1).

El funcionamiento y la configuración del dispositivo OSP/Satelital se lograron a través de un *firmware* y *software* de comunicación, programados en C y Java, respectivamente, que se registraron en la dirección nacional de derechos de autor. El *firmware* permite el control de dos puertos seriales UART con tasa de transmisión variable, capaces de enviar y recibir datos desde y hacia otros dispositivos compatibles en su configuración y protocolo de comunicación. Un puerto A se

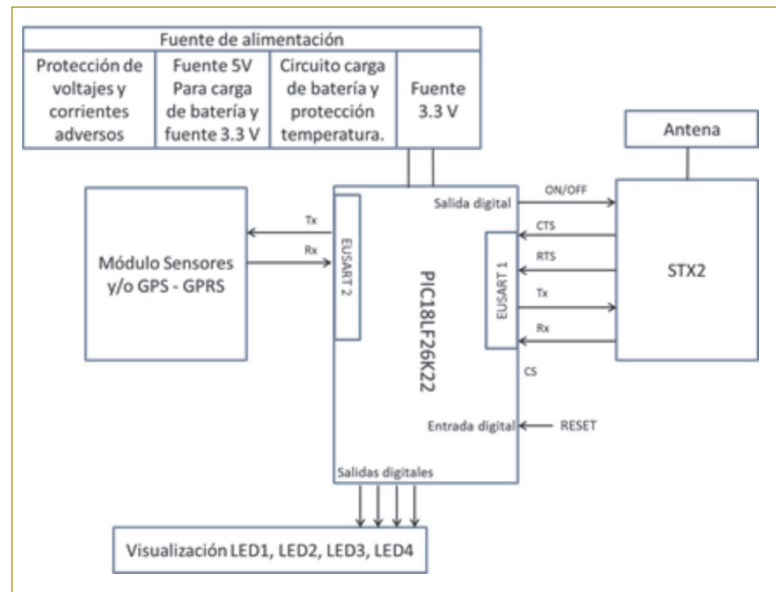


Figura 1. Diagrama esquemático del dispositivo OSP/Satelital.

comunica con equipos GPRS ya existentes: TT8750+ de Skypatrol y Syrus de DCT, mientras que el otro puerto B se enlaza con un módem satelital: STX2. El *software* facilita la configuración del dispositivo OSP/Satelital en tres modos de operación, transmitiendo datos en forma serial hacia la interfaz aérea.

Los datos recibidos en la plataforma satelital de Globalstar® forman un archivo con extensión .xml, en el cual se encuentra un mensaje con información codificada (hora, fecha, número de serie del equipo GPRS y carga útil) y relevante para el usuario. La decodificación de esta información se lleva a cabo mediante un aplicativo que abre el Socket TCP, por donde llegan los datos satelitales usando el protocolo FTP.

Para la visualización de los datos del usuario final, se diseñó y construyó una interfaz gráfica sobre una plataforma creada en el *framework* Django usando el modelo de programación MVC. En esta plataforma reposa una base de datos PostgreSQL con extensión PostGIS, en la cual se guardan/extraen los datos recibidos del satélite. El usuario final tiene acceso a la información relacionada con su activo móvil mediante un navegador web.

La integración del *hardware*, *firmware* y *software* conforman el dispositivo OSP/Satelital con capacidad de transmitir información de manera simple a través de la red celular y satelital de Globalstar. El equipo cuenta con interfaces y comandos simples para comunicación con dispositivos anfitriones, como computadores, uni-



dades AVL, módulos de desarrollo, microcontroladores y FPGA. Capaz de transmitir mensajes de hasta 144 *bytes* en paquetes de 9 *bytes*. Puertos de entrada: USB, DB-9 y conector para desarrollo. El sistema recibe comandos y datos a través de las anteriores interfaces mediante protocolo serial, se empaqueta y realiza la transmisión a través del canal satelital, incluyendo datos de verificación de paridad para asegurar que se transmitirán correctamente.

Con este dispositivo se asegura alta probabilidad de transmisión en todo el territorio nacional, siempre y cuando se tenga línea de vista al cielo y las condiciones climáticas lo permitan.

Para evitar consumo de energía innecesario se implementó un bit de control para el encendido y apagado del módulo satelital STX2, por lo que el envío de datos satelitales está sujeto a este bit de control.

## METODOLOGÍA

El diseño y la construcción del dispositivo OSP/Satelital tuvieron la intencionalidad de ofrecer un canal de comunicaciones satelital de respaldo para unidades de localización vehicular AVL (equipos GPRS comerciales: TT8750+ y TT8750: Skypatrol; Syrus: DCT) utilizadas para el seguimiento en tiempo real de activos móviles.

El desarrollo del dispositivo OSP/Satelital para la localización y seguimiento de activos móviles que sea compatible con los sistemas GPRS ya existentes contempló actividades de investigación teórica, simulación, diseño, implementación, pruebas de laboratorio, ajustes y operación en campo, que se hicieron a través de las cuatro fases señaladas en la formulación de la propuesta de investigación, a saber: 1) Revisión bibliográfica y apropiación del estado del arte y diseño preliminar; 2) Diseño e implementación del dispositivo OSP/Satelital-E y pruebas; 3) Integración de *hardware* y *software*, y 4) Transferencia tecnológica, socialización de resultados y finalización. El apego a dicha metodología permitió alcanzar los objetivos específicos propuestos.

El dispositivo OSP/Satelital se desarrolló de manera modular: diseño y construcción del *hardware*, programación de *software* y *firmware* para el dispositivo, desarrollo del aplicativo *socket* para recepción de datos y construcción de la interfaz gráfica para visualizarlos.

El proceso de diseño *hardware* partió de dos insumos: las investigaciones preliminares que hizo la entidad beneficiaria y la identificación de las necesidades de los usuarios.

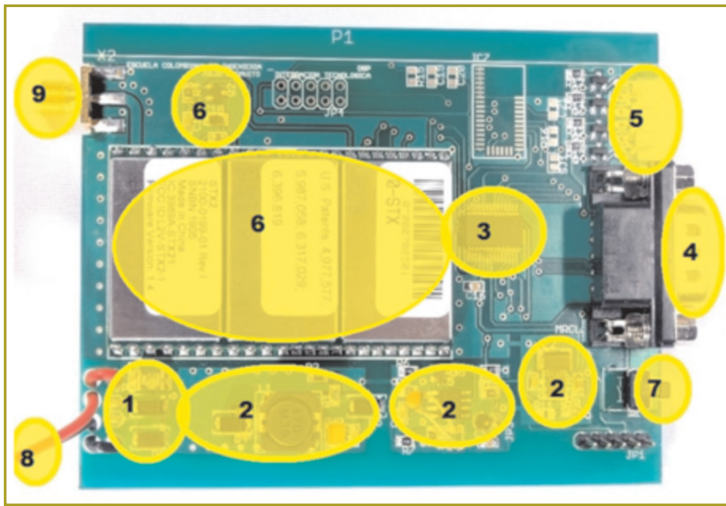
Las actividades comprendidas tanto en el diseño como en la construcción del *hardware* se programaron en el cronograma y se organizaron por fases: 1) Estado del arte y dimensionamiento del sistema; 2) Diseño y desarrollo del prototipo; 3) Optimización y definición de la línea de producción; 4) Fabricación de diez unidades.

A partir de las necesidades detectadas de los usuarios se dimensionó el dispositivo OSP/Satelital-E. Éste se representó mediante un diagrama de bloques electrónicos en borrador evaluado por las entidades ejecutora (Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito) y beneficiaria (OSP Ltda.).

El resultado de estas evaluaciones dio luz verde al diseño de la tarjeta principal. Éste fue modular y comprendió las siguientes partes: fuente conmutada de cinco voltios, cargador de batería, fuente conmutada *buck boost* de 3.3 V., circuito MAX3232, microcontrolador PIC18LF26K22, circuito STX2, *bluetooth*, visualización, circuito de protección y *reset*. El diseño de cada módulo estuvo acompañado por modelamiento matemático, cálculos y simulación, y tuvo una evaluación de conformidad/no conformidad por las partes interesadas; de esta forma, se respaldaba el avance en el diseño de la tarjeta.

En el procedimiento de cálculos del diseño por módulo se consideraron variables de entrada y salida, elementos constitutivos del módulo, disipación máxima de potencia (consumos máximos de corriente) por elemento y niveles de polarización de los circuitos integrados. En este punto de la ejecución del proyecto, se contaba con todos los módulos que constituían el esquemático de la tarjeta principal. El siguiente paso fue integrarlos. En la siguiente figura se muestra la integración de los bloques en la tarjeta electrónica (figura 2).

Con las dimensiones de la tarjeta se inicia el proceso de diseño y construcción del molde, para la construcción de la caja. Todo el conjunto, tarjeta y caja deben cumplir normas según regulación nacional, estándares internacionales y la región de funcionamiento del dispositivo OSP/Satelital-E. En el caso concreto del dispositivo OSP/Satelital, es necesario que cumpla el estándar C63.4 de la IEEE y certificación Globalstar®.



**Figura 2.** Tarjeta electrónica OSP/Satelital con sus bloques circuitales: 1) Protecciones; 2) Fuente; 3) Procesamiento digital; 4) Comunicaciones; 5) Visualización; 6) Módulo satelital; 7) Reset; 8) Cable de alimentación; 9) Conector de la antena.

**RESULTADOS**

Los datos del módulo externo o GPRS son variables de medición o geolocalización de activos móviles como latitud, longitud, orientación, altura, velocidad, temperatura, humedad y prácticamente cualquier variable medible. Éstas deben estar en formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange) y no pueden superar los 300 *bytes* para evitar desbordamientos en el *buffer* del microcontrolador. Con esta información

del activo móvil se conforma la trama banda base que se muestra más abajo (figura 3).

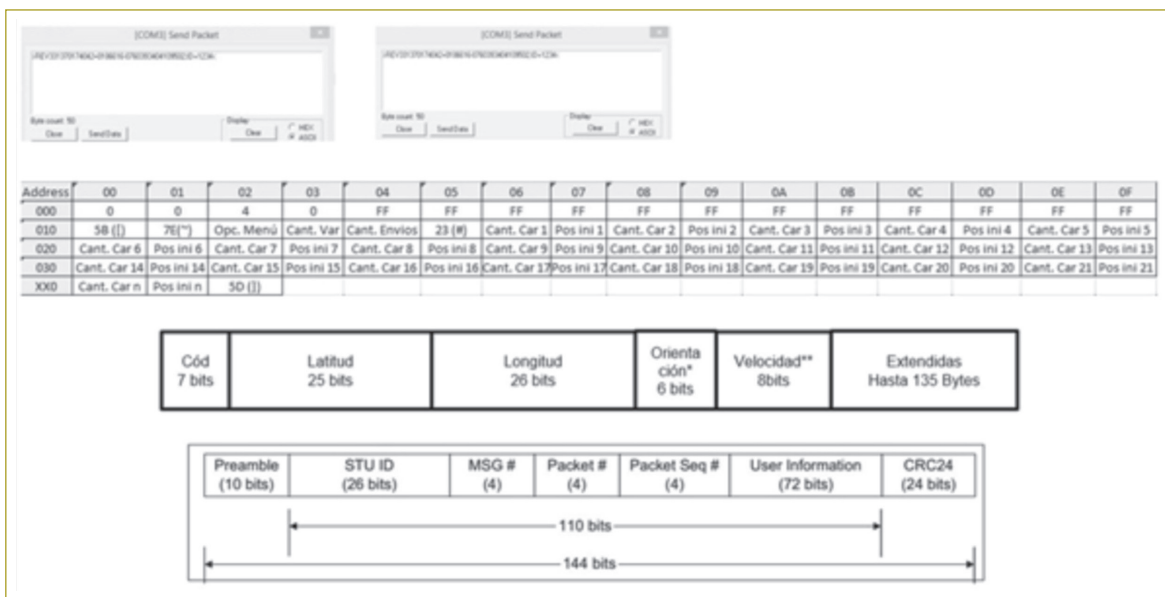
Esta información es enviada serialmente a la MAX232 y de ésta a la interfaz serial EUSART 2 del microcontrolador PIC18LF26K22 para que sean procesados. Luego el micro los retransmite a través de su interfaz serial EUSART 1 al módem satelital STX2 del fabricante Globalstar®, que se encarga de la transmisión satelital.

La señal banda base modula DSSS (*Direct-Sequence Spread Spectrum*), una portadora digital, de tal forma que aumente el ancho de banda de la transmisión y reduzca la densidad de potencia espectral (Paz et al., 2015). La señal resultante tiene un espectro muy parecido al del ruido y se transmite con una potencia isotrópica radiada efectiva: PIRE de 18 dBm +/- 2dB (figura 4).

El usuario puede seleccionar la frecuencia RF a la cual quiere transmitir su información; ésta se puede escoger en un rango comprendido entre 1611,25 MHz y 1818,75 MHz, con una resolución de 2,5 MHz entre canales.

La comunicación entre el dispositivo OSP/Satelital y el servidor (recepción de datos por el usuario) puede hacerse a través de la red celular o mediante la constelación de satélites de Globalstar®. La propagación de la información en la red satelital se hace por conmutación de paquetes.

La adecuación de la información en el transmisor y su recuperación en el receptor fueron posibles mediante protocolos de comunicación implementados con len-



**Figura 3.** Conformación de la trama banda base.

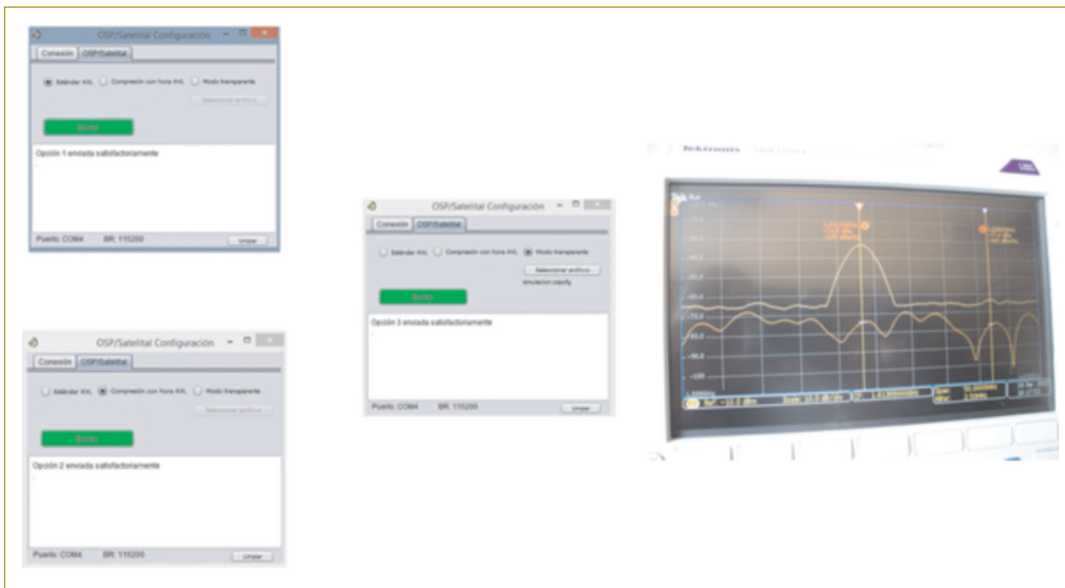


Figura 4. Envíos realizados desde el dispositivo OSP/Satelital.

guajes de programación Java, Python y C, Framework Django y técnicas de desarrollo web Ajax.

La siguiente información corresponde a los resultados de los protocolos de pruebas de *software* registrados durante la realización de éstas (figuras 5 a 12).

Se verifica el estado de los registros de recepción de datos. Esta revisión se llevó a cabo mediante la función *debugger on-circuit* del MPLABX.

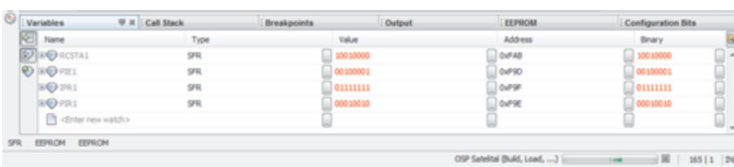


Figura 5. Registros SFR de interrupción y recepción.

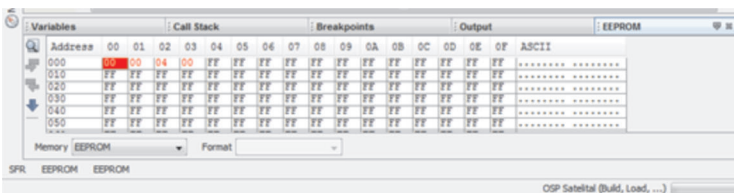


Figura 6. Estado de la EEPROM.

Se verifica la conexión con dispositivo OSP/Satelital. En esta misma figura se evidencia la tasa de 115.200 baudios por segundo a la que se configuró el sistema.

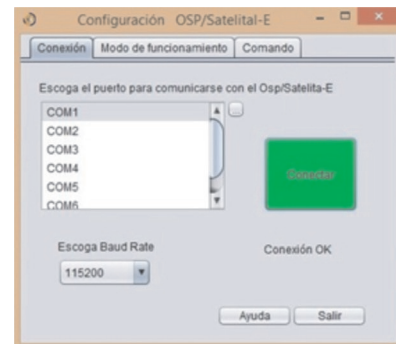


Figura 7. Software de configuración OSP/Satelital. Pestaña "Conexión". Modo de funcionamiento básico 1.

Se configura para la transmisión de información en modo estándar AVL.

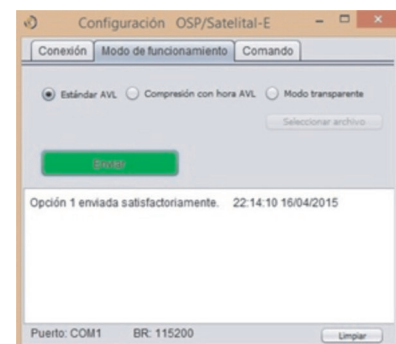


Figura 8. Software de configuración OSP/Satelital. Pestaña "Configuración". Modo estándar.





- Inicios de registro del trazado de circuito impreso: planos eléctricos y electrónicos.
- Inicios de certificación del modelo de utilidad.
- Inicios de registro de modelo industrial: planos de los moldes y de las cajas de antena y módulo principal.
- Archivos de diseño y de fabricación de las tarjetas PCB principal y de antena.
- Lista de componentes e insumos nacionales e internacionales.
- Manual de funcionamiento y operación.
- Documentos de cálculos de diseño, metodologías y protocolos de pruebas de conformidad.

En cuanto a *software*, se puede mencionar que la operación del dispositivo OSP/Satelital requiere la integración de diferentes *softwares* que forman parte del proceso de recepción y transmisión de datos, cuyo propósito es ser observables y entendidos por un usuario final. Los datos son tratados por dos *softwares* y un *firmware* en el siguiente orden: Firmware, Socket, Trace&Trace. Cabe aclarar que el *firmware* puede ser modificable mediante el *software* de configuración.

## CARACTERIZACIÓN DEL DESARROLLO

De acuerdo con la tipología de proyectos de carácter científico, tecnológico e innovación de Colciencias (Ojeda et al., 2011), el concepto de innovación puede darse en tres categorías: producto, proceso o servicio. Para el caso de la presente investigación, el componente innovador se encuentra en el producto y el proceso.

En cuanto al producto, el dispositivo OSP/Satelital es novedoso por las siguientes razones:

- Para transmitir información proveniente del activo móvil y de manera continua, se utilizan enlaces de radio GPRS hacia la red celular, y cuando esta cobertura se pierde, el dispositivo OSP/Satelital habilita un canal de respaldo para mantener la transmisión (Zaidi & Mark, 2005). Para lograr lo anterior, el dispositivo GPRS envía un dato al microcontrolador que le indica la ausencia de cobertura. Esta información se usa para conmutar la comunicación al STX2 que se encarga de continuar la comunicación a través de un canal satelital. Cuando reaparece el cubrimiento de la red celular, el dispositivo GPRS envía un dato al microcontrolador que le indica la

presencia de cobertura. El microcontrolador desactiva automáticamente el canal de respaldo satelital y retorna la comunicación a la unidad GPRS.

- El dispositivo OSP/Satelital es compatible con cualquier equipo GPRS existente en el mercado que disponga de un puerto RS232 y protocolo ASCII. Esto se logra a partir de un *software* de configuración que ajusta el *baudrate*, bits de parada, número y orden de las variables; de igual manera, reconoce el dispositivo GPRS con el cual se conecta y adecua su información en una nueva trama para retransmitirla.
- El dispositivo OSP/Satelital emplea el puerto RS232 para conectar unidades GPRS y no GPRS que hagan rastreo de activos móviles. Sin embargo, un requisito importante es que los equipos no GPRS se comuniquen mediante protocolo ASCII y puerto RS232. Esto es posible gracias a que el OSP/Satelital es configurado mediante un *software* especializado para que reconozca y homologue el dispositivo conectado y permita transmitir cualquier información requerida por el terminal.

Además, para su desarrollo se hizo una gestión de los recursos amigable con el medio ambiente, en cuanto redujo la generación de residuos electrónicos al reusar módems GPRS ya existentes y minimizó el consumo de materiales.

## CONCLUSIONES

El desarrollo del dispositivo OSP/Satelital integró *hardware*, *firmware* y *software*, y fue capaz de transmitir información (mensajes de hasta 144 *bytes* en paquetes de nueve *bytes*) de forma simplex y con cobertura nacional. El equipo también cuenta con interfaces y comandos simples para comunicación con computadores, unidades AVL, módulos de desarrollo, microcontroladores, FPGA, entre otros, al igual que con puertos de entrada USB, DB-9 y conector para desarrollo. El dispositivo empaqueta comandos y datos que recibe serialmente de las anteriores interfaces, les agrega datos de verificación de paridad para asegurar que se transmitirán correctamente y los envía a través del canal satelital.

El dispositivo OSP/Satelital se encarga del procesamiento digital y la modulación para el envío satelital; se activa automáticamente cuando pierde la cobertura de la red celular. Este equipo emplea la banda de frecuencias

de microondas L, opera a una frecuencia central de 1615 MHz y cuenta con un ancho de banda de 2,5 MHz. Por medio de un *software* de configuración, el dispositivo OSP/Satelital es configurado con información del equipo GPRS que se va a conectar para que sea reconocido y funcione correctamente.

La información enviada por el canal satelital se direcciona al servidor FTP usando programación Python. Este *software* decodifica la información y la transforma en los datos que serán impresos en pantalla. Este proceso culmina con la presentación de la información en la plataforma Trace&Trace, la cual será la interfaz gráfica de usuario a la que se accederá por medio de un usuario y contraseña. La interfaz cuenta con espacios para presentar las variables enviadas, al igual que un mapa que ubica la posición del activo móvil.

Con el funcionamiento del dispositivo OSP/Satelital se comprobó alta probabilidad de transmisión en todo el territorio nacional, baja latencia y probabilidad de error, siempre que se garantizara línea de vista con el satélite y condiciones climáticas favorables.

## REFERENCIAS

- Ojeda, Y. et al. (2011). Tipología de proyectos de carácter científico, tecnológico e innovación. Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias.
- Paz, H., Arévalo, J. A. & Ortiz, M. A. (2015). Design and development of an electronic device for data transmission with universal coverage. *Revista de Ingeniería e Investigación*, 35(1), pp. 86 - 91.
- Zaidi, Z.R. & Mark, B.L. (2005). Real-time mobility tracking algorithms for cellular networks based on Kalman filtering. *IEEE Trans. Mobile Comput*, vol. 4, pp. 195-208.
- Zhao, Zh. Zhou, W. & Wang, N. (2009). Shipping Monitoring System Based on GPS and GPRS Technology, *2009 WASE International Conference on Information Engineering: ICIE*, vol. 1, pp. 346-349.

# Evaluación de los beneficios de la captura de CO<sub>2</sub> para el tratamiento de agregados finos reciclados de concreto, como una estrategia para combatir el cambio climático\*

Benefit assessment of CO<sub>2</sub> capture for treating fine recycled concrete aggregates, as a strategy to fight climate change

MARFA MOLANO CAMARGO<sup>1</sup> - NANCY TORRES CASTELLANOS<sup>2</sup> - CINDY MOLANO CAMARGO<sup>3</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural. Escuela Colombiana de Ingeniería. Estudiante de doctorado en Infraestructura y Medio Ambiente, Universidad de Edimburgo, Escocia.
2. Doctorado en Ciencia y Tecnología de los Materiales. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Profesor, Escuela Colombiana de Ingeniería.
3. Pregrado en Ingeniería civil. Escuela Colombiana de Ingeniería.

marfa.molano@mail.escuelaing.edu.co - nancytorres@escuelaing.edu.co - cindy.molano@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 15/03/2015 Aceptado: 15/06/2015  
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

\* Artículo ganador del Premio Eficiencia - Davivienda 2014.

## Resumen

Considerar los desechos de la industria de la construcción como fuente de recursos para producir materiales de construcción con baja huella de carbono, a partir de escombros derivados de las actividades de demolición del concreto y a través de la innovadora tecnología de captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAD), por medio de carbonatación acelerada, es un novedoso enfoque para contribuir al cerramiento del ciclo del carbono en los materiales de construcción, aportando al desarrollo sostenible y resiliente de la región.

En este artículo se presentan los resultados experimentales de la evaluación a corto plazo de algunas propiedades físicas y de durabilidad de muestras de mortero elaboradas con agregados finos reciclados de concreto (AR), expuestos a carbonatación acelerada. Se realizaron mezclas de mortero, con diferentes porcentajes de remplazo de arena natural por ARSC (agregado fino reciclado sin carbonatar) y ARC (agregado fino reciclado carbonatado) en porcentajes del 0, 25, 50 y 100 %. Aunque las mezclas de mortero elaboradas con ARC registraron unos valores de propiedades mecánicas y de durabilidad inferiores a la mues-

tra control (100 % arena natural), las mezclas de mortero elaboradas con ARC presentaron mejor desempeño en todas las propiedades, en comparación con las mezclas de mortero elaboradas con ARSC. Esto demostró la factibilidad de aplicar la tecnología CAD como un proceso para mejorar las propiedades de los agregados reciclados, a la vez que se combate el cambio climático. La mezcla de mortero elaborada con agregados finos reciclados, que obtuvo los mejores resultados, correspondió a 25 % ARC.

**Palabras claves:** carbonatación, captura de CO<sub>2</sub>, escombros, reciclado, agregados.

## Abstract

Considering the construction industry's waste as a source to manufacture construction materials with a low carbon footprint, using debris derived from concrete demolition activities and through the innovative technology of carbon capture and storage (CCS), through accelerated carbonation, is a breakthrough approach to help to close the carbon

cycle in construction materials, supporting a sustainable and resilient development in the region.

This paper presents the experimental results of a short-term assessment of some of the physical and durability properties of mortar tests done with fine recycled concrete aggregates (RCA) exposed to accelerated carbonation. Mortar mixtures were prepared with different percentages of natural sand replacement by un-carbonated RCA and carbonated RCA in percentages of 0, 25, 50, and 100.

Even though the mortar mixtures prepared with carbonated RCA registered lower values in their mechanical and physical properties than the control sample (100% natural sand), the mixtures prepared with carbonated RCA showed a better performance in all properties than mortar mixtures prepared with un-carbonated RCA. This showed the feasibility of applying CCS technology as a process to improve the properties of recycled aggregates, as well as fighting climate change. The mortar mixture prepared with fine recycled aggregates that showed the best results was 25% carbonated RCA.

**Keywords:** carbonation; CO<sub>2</sub> capture; debris; recycled; aggregates.

## Fórmulas, siglas y símbolos

ARC	agregados reciclados de concreto
CaCO <sub>3</sub>	calcita o carbonato de calcio
CaO	óxido de calcio
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
C-S-H	silicato de calcio hidratado
DIA	desechos industriales alcalinos
MgO	óxido de magnesio
Mt	millones de toneladas
RC&D	residuos de construcción y demolición
TCA	tecnología de carbonatación acelerada

## INTRODUCCIÓN

Se ha estimado que el sector de la construcción es una de las grandes fuentes de generación de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), contribuyendo de manera significativa al calentamiento global (Rehan & Nehdi, 2005; Yamasali, 2003).

Por ejemplo, la construcción y operación de las edificaciones en Europa representan entre el 36 y 40 % del total de la energía consumida y de las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas en ese continente (Airaksinen & Matilainen, 2011; Urge, 2007), mientras que en Estados Unidos constituye el 54 % (Guggemos, 2005).

Por otra parte, teniendo en cuenta que en el concreto los agregados ocupan entre el 60 y 75 % de su volumen (Kosmatka et al., 2002), el sector de la cons-

trucción ha sido catalogado como uno de los grandes consumidores de recursos naturales. De acuerdo con algunas estimaciones (Bleischwitz, 2011), la demanda mundial de agregados es de casi 20.000 millones de toneladas al año, con un crecimiento proyectado de 4,7 % por año.

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 % corresponde a residuos de concreto (Li, 2002). En el año 2009 se produjeron en Bogotá aproximadamente 12 millones de toneladas de RC&D, el equivalente a 70 torres Colpatria (Méndez, 2011), que ocasionaron 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 sostenible 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 generación de estructuras amigables con el medio ambiente (Roussat, Dujet & Méhu, 2009).

La producción y uso de agregados reciclados de concreto (ARC) es una práctica común en países desarrollados. Naciones como Estados Unidos producen anualmente alrededor de 140 millones de toneladas de ARC (Report Construction Materials Recycling Association, 2013). En Europa, Alemania es 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 en cuarto lugar Francia con 17 Mt (Report European Aggregates Association, 2011). Dosho (2007) reportó que en Japón se registra una tasa de aproximadamente 98 % de reciclaje de RC&D de concreto, para manufacturar ARC.

Aunque en Colombia se presentan bajos porcentajes de reciclaje de RC&D (más o menos entre 5 y 10 %), y las regulaciones para el aprovechamiento de escombros no se encuentran bien definidas (Villamizar, 2014), el



gobierno está implementando políticas que regulen y promuevan las actividades de reciclaje de RC&D. Por ejemplo, en Bogotá, la Resolución 2397 de 2011 indica que las obras de infraestructura deben incluir elementos reciclados provenientes de los centros de tratamiento o aprovechamiento de escombros legalmente constituidos, en un porcentaje no inferior al 10 % del total de los metros cuadrados que se van a construir en el caso de las entidades públicas y 5 % en el caso de las empresas privadas que desarrollen proyectos de construcción. Cada año dicho porcentaje se debe aumentar en cinco unidades porcentuales hasta alcanzar mínimo un 25 %.

Sin embargo, varios autores han reportado que las propiedades mecánicas y de durabilidad de los ARC son inferiores a las exhibidas por los agregados naturales (Liu, Xiao & Sun, 2011; Poon & Chan 2007; Kou, Zhan & Poon 2012; Khatib 2005). Entre los principales factores que influyen en su bajo desempeño se encuentran la presencia de porciones de mortero adheridas (generalmente fisuradas) a la superficie del ARC, las cuales le confieren mayor porosidad y una mayor capacidad de absorción de agua (Tomosawa & Noguchi, 2000; Kawano, 2000; Ravindrarajah & Tam, 1985); el débil comportamiento en la zona de transición de la interfase entre el ARC y la nueva pasta de cemento (Li & Xiong, 2001), y contenidos de sulfatos, cloro e impurezas (Olorunsogo & Padayachee, 2002; Kawano, 2000).

Diversos tratamientos se han propuesto con el fin de mejorar el comportamiento de los ARC, tales como métodos de limpieza con ultrasonido (Katz, 2004); separación del mortero adherido al agregado, por medio del método de molienda con esferas (Montgomery, 1998); tratamientos térmicos que incluyen altas temperaturas (500 °C o mayores) (Tateyashiki et al., 2001; Zhonghe et al., 2008) y tratamientos químicos en los cuales los ARC se sumergen en diferentes soluciones (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) (Tam et al., 2007). Sin embargo, estas técnicas generan mayor cantidad de residuos, consumen altas cantidades de energía o utilizan sustancias tóxicas, limitando su uso actual debido a los impactos negativos generados en el medio ambiente (Deyu et al., 2010).

En los últimos años se han desarrollado varias investigaciones con el fin de implementar novedosas metodologías verdes que disminuyan las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el sector de la construcción. El

desarrollo e implementación de energías renovables y la fabricación de cementos ecológicos contribuyen a reducir las emisiones de dióxido de carbono, pero no son suficientes para mitigar totalmente los impactos climáticos generados por la actividad de la construcción (Fernández et al., 2004). Es así como se ha desarrollado una tecnología para captar y almacenar CO<sub>2</sub> en residuos industriales alcalinos (DIA), con el fin de utilizarlos posteriormente en la manufacturación 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), (Aimaro et al., 2012; Erin et al., 2012; Hasanbeigi et al., 2012), con la ventaja de que los procesos térmicos involucrados en el procesamiento de los DIA, como por ejemplo la calcinación del clínker del cemento, incrementan la reactividad de sus componentes (CaO, MgO, entre otros), facilitando la fijación del CO<sub>2</sub> (Huijgen, Ruijg, Comans & Witkamp, 2006).

En Inglaterra se construyó una planta piloto 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 recolectó en reactores, con el fin de usar este CO<sub>2</sub> para el procesamiento de los agregados (Gunning, 2011).

De esta forma, 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<sub>2</sub> hasta un 16,5 % de su peso propio (tabla 1), siguiendo el mecanismo de reacción descrito en la parte izquierda de la figura siguiente (figura 1) (Fernández, Simons, Hills & Carey, 2004; García et al., 2008).

Bobiki (2012) estimó que los ARC pueden captar hasta 60 Mt de CO<sub>2</sub> cada año (cálculos realizados teniendo en cuenta la cantidad de RD&C de concreto generados en la Unión Europea, China y Estados Unidos)

Varias investigaciones (Engelsen, Mehus & Pade, 2005; Jonsson & Wallevik, 2005) han demostrado 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

aumento en la densidad, disminución de la porosidad y absorción de agua (Baojian, Poon & Shi, 2013; Kou & Poon, 2012; Kou, Zhan & Poon, 2014). El cambio en el sistema de poros puede explicarse por el incremento en volumen de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), compuesto resultante de la reacción entre el  $\text{CO}_2$  y las fases que contienen calcio, de aproximadamente 11,7 % en relación con el volumen del hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (Shu & Pen, 2012). Adicionalmente, la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) bloquea el sistema de poros debido a su baja solubilidad (Fernández, Simons, Hills & Carey, 2004).

**Tabla 1**

Composición química de agregados reciclados de concreto y su teórica ( $\text{TCO}_{2\text{captura}}$ ) y experimental captura de dióxido de carbono ( $\text{ECO}_{2\text{captura}}$ ) (tomado de Aimaro et al., 2012).

Composición química (% de peso propio)	
Componente químico	Porcentaje de peso propio
CaO	15-24
MgO	2-3
$\text{Na}_2\text{O}$	0,1
$\text{K}_2\text{O}$	0,2
Fijación del dióxido de carbono	
Parámetro	Porcentaje de peso propio
$\text{TCO}_{2\text{captura}}$	6,0-22
$\text{ECO}_{2\text{captura}}$	7,5-16,5

(a) Suponiendo que el calcio fija el 75 % de  $\text{CO}_2$ .

Kou y coinvestigadores (2014) evaluaron el comportamiento en mezclas de concreto elaboradas con agregados gruesos reciclados carbonatados (AGRC) y no carbonatados (AGR), y observaron que las mezclas de concreto preparadas con AGRC presentaron mejores resistencias que las mezclas de concreto confeccionadas con AGR y registraron valores ligeramente inferiores a la muestra control (100 % agregados gruesos naturales).

Por otra parte, Baojian et al. (2013) estudiaron diferentes parámetros que inciden en el proceso de carbonatación de los ARC, y hallaron que las fracciones más finas absorben un mayor porcentaje de  $\text{CO}_2$ .

Aunque la carbonatación es un proceso que ha demostrado beneficios en pastas de cemento y ARC, se debe recordar que este proceso tiene efectos adversos en las estructuras de concreto reforzadas, debido a

que las reacciones de carbonatación disminuyen el alto valor de pH presente en la pasta de cemento hidratada, despasivando el acero de refuerzo (Roy & Poh, 1999).

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 ( $\text{CO}_2$ ) (Van & Padovani, 2003; Cement Technology Roadmap, 2009), investigadores han enfatizado en la habilidad que tienen los materiales basados en cemento de absorber casi la misma cantidad de  $\text{CO}_2$  liberada químicamente a la atmósfera durante el proceso de calcinación del cemento (figura 1).

Así, se sugiere que la cantidad captada de  $\text{CO}_2$  en el concreto debería tomarse en cuenta en las evaluaciones ambientales, de la misma forma como la absorción de  $\text{CO}_2$  (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).

En atención a 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, esta investigación se enfoca en la evaluación de las propiedades mecánicas y de durabilidad, a corto plazo, de pastas de mortero elaboradas con ARC finos, expuestas a carbonatación acelerada, como una posible ruta que contribuya a su valorización sostenible y al cerramiento del ciclo de carbono en las estructuras de concreto.

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

### Materiales

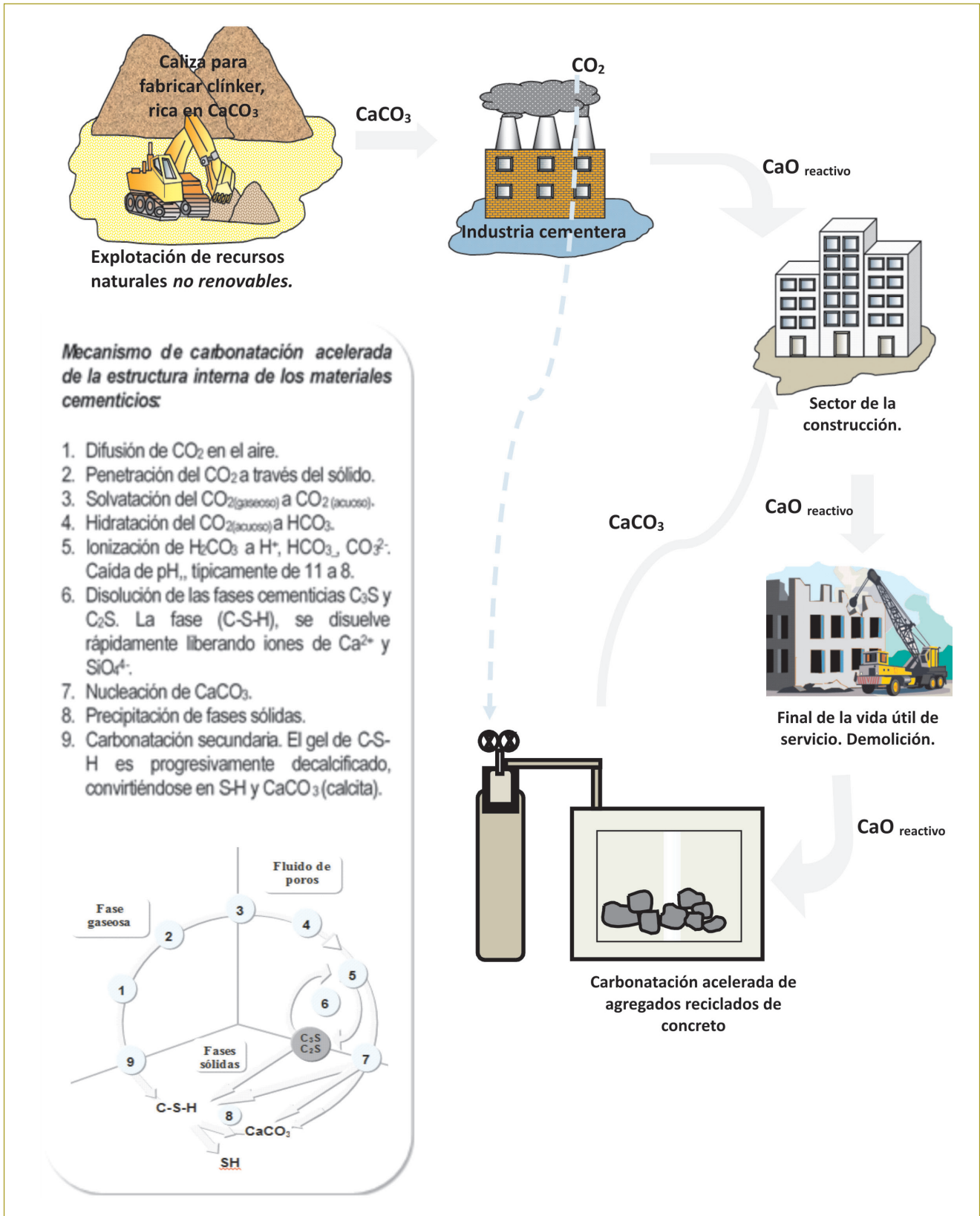
#### Cemento

Se utilizó cemento tipo Pórtland de uso general.

#### Agregados finos

Como agregado natural fino se empleó arena de río.

Los agregados reciclados finos (AR) se obtuvieron a partir de la trituración de especímenes de concreto seleccionados aleatoriamente, procedentes de residuos de ensayos realizados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería (figura 2).



**Figura 1.** Esquema del cerramiento del flujo del carbono propuesto en este estudio. En la parte inferior izquierda de la figura se describe el mecanismo de carbonatación acelerada de los materiales cementicios (elaboración propia basada en Fernández, Simons, Hills & Carey, 2004).





**Figura 2.** Máquina trituradora (tomado de Ensayos de Laboratorio ECI).

### Carbonatación acelerada del agregado fino reciclado de concreto

Los agregados reciclados finos de concreto (AR) se dividieron en dos grupos con el propósito de obtener una muestra control sin carbonatar (ARSC) y otra muestra carbonatada (ARC) (figuras 3 y 4). Los AR se secaron en un horno a una temperatura de 115 °C, durante 24 horas, hasta obtener un peso constante.

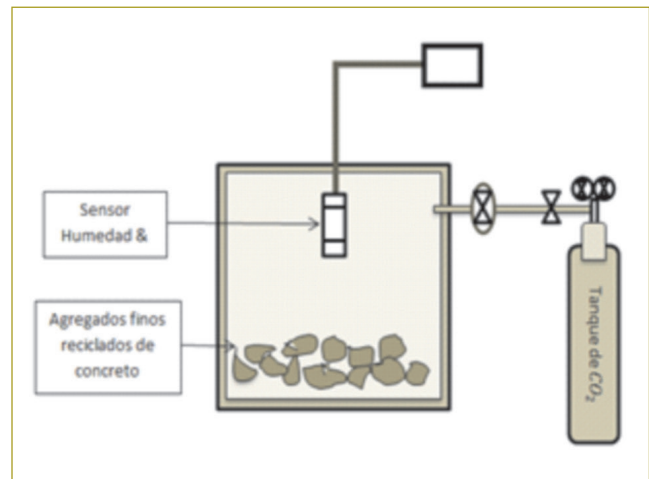
La muestra de ARC seca y fría se introdujo dentro de una cámara de carbonatación acelerada (figura 5), durante un periodo de 14 días, manteniendo una humedad relativa de 65 %, temperatura de 25 °C y una concentración de CO<sub>2</sub> de 6 %.



**Figura 3.** Muestra de agregados finos reciclados de concreto sin carbonatar (ARSC), sobre los cuales se aplicó una solución de fenolftaleína. El cambio de color rosado indica las zonas no carbonatadas. Se observa la presencia de granos carbonatados, producto de la carbonatación atmosférica de los cilindros viejos con los que se trituró este material (tomado de Ensayos de Laboratorio ECI).



**Figura 4.** Muestra de agregados finos reciclados de concreto carbonatados (ARC), sobre los cuales se aplicó una solución de fenolftaleína. El no cambio de color indica las zonas carbonatadas (tomado de Ensayos de Laboratorio ECI).



**Figura 5.** Montaje del ensayo de carbonatación acelerada en agregados finos reciclados de concreto. Tomado de Ensayos de Laboratorio ECI.

### Mezclas de mortero

Se elaboraron siete mezclas de mortero, con una relación agua/cemento (a/c) de 0,56, manteniendo constante una cantidad de cemento de 530 kg/m<sup>3</sup>. Las proporciones de la mezcla de mortero se diseñaron empleando el método de diseño por peso.

Se reemplazó la arena natural por agregados finos reciclados de concreto (AR), carbonatados (C) y sin carbonatar (SC), en porcentajes de sustitución de 25, 50 y 100 % (tabla 2). Además, se elaboró una mezcla control con 100 % de arena natural.



**Tabla 2**  
Cantidades de agregados finos naturales y reciclados (carbonatados y sin carbonatar) empleados en las mezclas de mortero.

ID mezcla	Denominación de la mezcla	Arena natural (kg/m <sup>3</sup> )	Arena reciclada (kg/m <sup>3</sup> )
0	Control	1325	0
1	25 % ARSC	994	331
2	50 % ARSC	663	663
3	100 % ARSC	0	1325
4	25 % ARC	994	331
5	50 % ARC	663	663
6	100 % ARC	0	1325

### Moldeo de especímenes y curado

Las mezclas se elaboraron en el laboratorio, manteniendo una temperatura de  $(23 \pm 4)$  °C. La humedad relativa del laboratorio fue de 55 %. Una vez moldeadas las probetas de mortero, éstas se almacenaron en un cuarto húmedo, conservando una temperatura de 23 °C  $\pm$  2,0 °C y a una humedad relativa mínima del 95 %, protegidas por un plástico para evitar la caída de gotas sobre su superficie.

Transcurridas 24 horas se desmoldaron las mezclas de mortero, para inmediatamente curarlas en un tanque de agua saturada con cal, a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C, hasta el día del ensayo (en este caso tres y siete días).

### Ensayos

#### Propiedades físicas del agregado fino reciclado de concreto

En el agregado fino reciclado de concreto carbonatado (ARC) y sin carbonatar (ARSC), se determinaron las propiedades de densidad aparente, nominal y en condición SSS, y el porcentaje de absorción, de acuerdo con la metodología descrita en la norma ASTM C128-84.

#### Propiedades físicas de las mezclas de mortero

La masa unitaria seca, el porcentaje de absorción después de inmersión y el volumen de vacíos (espacio de poros permeables) de las mezclas de mortero, se evaluaron a los tres y siete días de edad, con base en el procedimiento indicado en la norma ASTM C642-97.

Para esto se tomaron tres porciones individuales de cilindros de mortero de 100 mm de diámetro por 50 mm de longitud, por cada tipo de mezcla de mortero y edad de ensayo.

#### Ensayo de absorción inicial superficial (ISAT)

Para el ensayo de ISAT se utilizaron especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro por 200 mm de longitud. Se realizaron pruebas a los tres y siete días de edad, con base en la norma BS 1881: parte 208: 1996. El resultado registrado en el ensayo corresponde al promedio de tres probetas, elaboradas con la misma mezcla de mortero y ensayadas a la misma edad.

#### Sortividad

Esta propiedad se evaluó a los siete días de edad, en porciones de cilindros de mortero de 100 mm de diámetro por 50 mm de longitud, siguiendo las indicaciones señaladas en la norma ASTM C1585-2004. El resultado del ensayo corresponde al promedio de tres probetas.

#### Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se evaluó a los tres y siete días de edad, sobre tres cilindros de mortero de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura, siguiendo el procedimiento descrito en la norma NTC 220-12.

### Resultados y discusión

#### Propiedades físicas del agregado fino reciclado de concreto.

Las propiedades físicas del AR, carbonatado (ARC) y sin carbonatar (ARSC), se indican a continuación (tabla 3).

**Tabla 3**  
Propiedades de densidad y absorción de agregados finos reciclados de concreto, carbonatados (ARC) y sin carbonatar (ARSC)

Propiedad	Valor ARC	Valor ARSC
Densidad aparente	2,047 g/cm <sup>3</sup>	1,928 g/cm <sup>3</sup>
Densidad condición SSS	2,261 g/cm <sup>3</sup>	2,188 g/cm <sup>3</sup>
Densidad nominal	2,606 g/cm <sup>3</sup>	2,607 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	10,5 %	13,5 %

**Tabla 4**  
Propiedades de densidad y absorción del agregado fino natural

Propiedad	Valor
Densidad aparente	2,523 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	3,4 %

Las menores densidades registradas por los agregados reciclados, así como su alto porcentaje de absorción, en comparación con los agregados finos naturales, son ocasionadas probablemente por la pobre calidad del mortero viejo adherido al agregado reciclado y la posible presencia de impurezas y fisuras (Tomosawa & Noguchi, 2000; Kawano, 2000; Ravindrarah & Tam, 1985; Li & Xiong, 2001; Olorunsogo & Padayachee, 2002; Kawano, 2000).

Los agregados finos reciclados de concreto, después de haber sido carbonatados (ARC), registraron una disminución del porcentaje de absorción de agua de 22,2 %, en comparación con los ARSC; de manera contraria, la densidad aparente de los ARC aumentó en un 5,8 % en relación con los ARSC, efectos que coinciden con los resultados reportados por (Kou, Zhan & Poon, 2014).

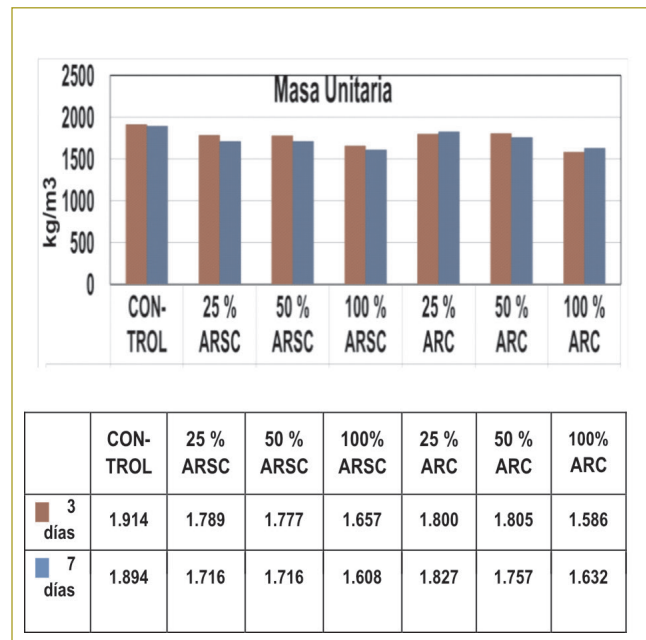
Como la densidad y la absorción están ligadas con las características de los poros en el agregado, el aumento en las propiedades de densidad y la disminución en la absorción de agua de los ARC pudieron ocurrir debido a la formación de productos de carbonatación, como la calcita (CaCO<sub>3</sub>), principalmente, depositada en los poros, lo que ocasiona cambios en su estructura debido al incremento de volumen que experimenta este producto de carbonatación (CaCO<sub>3</sub>), en comparación con los componentes del agregado reciclado no carbonatado (Ca(OH)<sub>2</sub>) (Shu & Pen, 2012).

Además, este factor podría estar acompañado por un posible efecto de bloqueo en los poros por parte de los productos de carbonatación, los cuales poseen menor solubilidad que los productos no carbonatados (Fernández, Simons, Hills & Carey, 2004).

### Propiedades físicas de las mezclas de mortero

En las figuras siguientes se presentan los resultados de masa unitaria, porcentaje de absorción después de inmersión y volumen de vacíos de las mezclas control, y las mezclas preparadas con ARC y ARSC, ensayadas a los tres y siete días (figuras 6, 7 y 8).

Se puede apreciar que todas las muestras elaboradas con agregados reciclados tuvieron menores masas unitarias en relación con la mezcla control, y las muestras elaboradas con ARC presentaron mayores valores de masa unitaria en comparación con las muestras elaboradas con ARSC. Las mezclas 25 % ARC, 50 % ARC y 100 % ARC registraron incrementos en la masa unitaria evaluada a los siete días, de 6,08, 2,33 y 1,49 %, en comparación con las mezclas no carbonatadas 25 % ARC, 50 % ARC y 100 % ARC, respectivamente (figura 6).



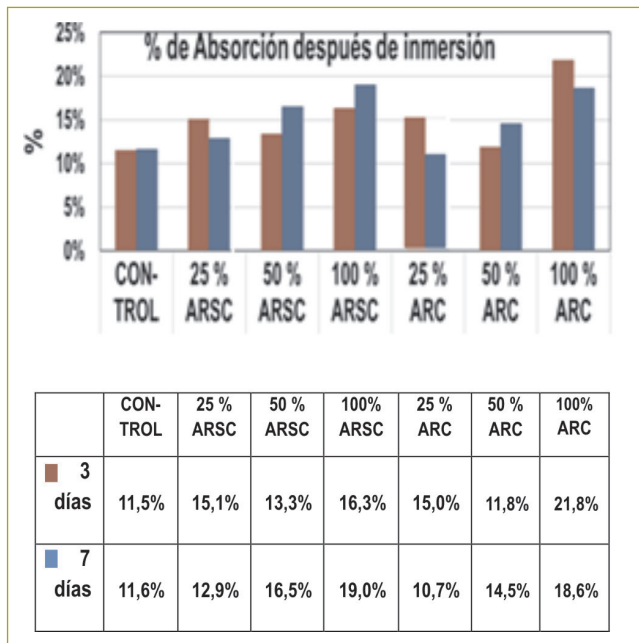
**Figura 6.** Gráfica del ensayo de masa unitaria en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

Se observa que de las mezclas preparadas con agregados reciclados, la mezcla 25 % ARC obtuvo los mayores valores de masa unitaria a los tres y siete días, aunque ligeramente inferiores a los valores de masa unitaria de la mezcla control, 6 y 3,5 %, respectivamente. Por otra parte, la mezcla que presentó los valores más bajos de masa unitaria a los tres y siete días, corresponde a 100 % ARSC, cuyos valores fueron 13,4 y 15,1 % inferiores a la mezcla control.

Como la propiedad de masa unitaria está relacionada con la porosidad de los agregados, se podría esperar que los agregados reciclados carbonatados presenten mayores valores de masa unitaria que los no carbonatados, debido a la formación de productos de carbonatación que modifican el sistema de poros.

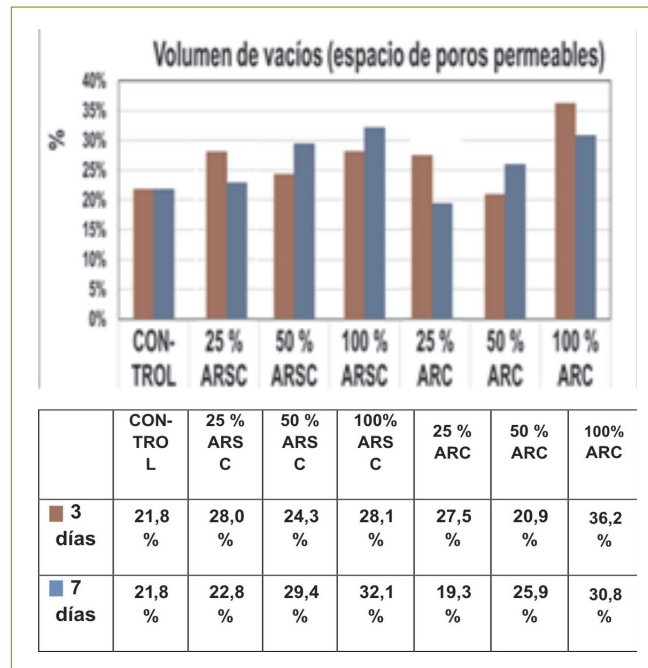
En las figuras siguientes se observa que las muestras elaboradas con ARC presentaron valores de porcentaje de absorción después de inmersión y de volumen de vacíos a los siete días, inferiores a los registrados en las muestras que se hicieron con ARSC. La mezcla preparada con agregados reciclados que tuvo los menores valores de absorción después de inmersión y de volumen de vacíos a los siete días es la mezcla 25 % ARC, con porcentajes de 20,6 y 18,6 %, inferiores a los presentados por las mezclas 25 % ARSC, respectivamente.

Con respecto a la mezcla control, los porcentajes de absorción después de inmersión y de volumen de vacíos a los siete días de las mezclas 25 % ARC fueron inferiores en 7,8 y 11,5 %, respectivamente (figuras 7 y 8).



**Figura 7.** Gráfica del ensayo de porcentaje de absorción después de inmersión en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

La disminución en los valores de absorción después de inmersión y de volumen de vacíos, presentada en las mezclas elaboradas con ARC, puede atribuirse a la formación de productos carbonatados en los agregados reciclados carbonatados, que posiblemente bloquean sus poros y disminuyen su interconectividad, influyendo positivamente en las mezclas de mortero preparadas con ARC. Estos resultados son concordantes con los incrementos en la densidad aparente y la disminución del porcentaje de absorción de los ARC, indicados anteriormente (tabla 3).



**Figura 8.** Gráfica del ensayo de porcentaje de absorción después de inmersión en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

### Ensayo de absorción inicial superficial (ISAT)

En las figuras siguientes se señalan los valores de tasa de absorción superficial inicial registradas a los 10, 20 y 30 minutos, respectivamente, en las mezclas control y las mezclas preparadas con ARC y ARSC, ensayadas a los tres y siete días (figuras 9, 10 y 11).

Se observa en los resultados que a medida que transcurre el ensayo de tasa de absorción superficial inicial, la tasa disminuye, debido a la saturación de la superficie de concreto.

Se puede apreciar que las mezclas de mortero elaboradas con agregado reciclado con porcentajes de 25 y 50 % de sustitución, tanto carbonatadas (ARC) como sin carbonatar (ARSC), presentaron menores valores de tasa de absorción superficial inicial, evaluada a los 20 y 30 minutos, a la edad de siete días, en comparación con las mezclas de control.

Los valores de tasa de absorción superficial inicial medida a los 30 minutos, a la edad de siete días, en las mezclas de 25 % ARC, 50 % ARC y 25 % ARSC, reportaron porcentajes inferiores de 43,8, 25 y 12,5 % en relación con los valores presentados en las mezclas control.

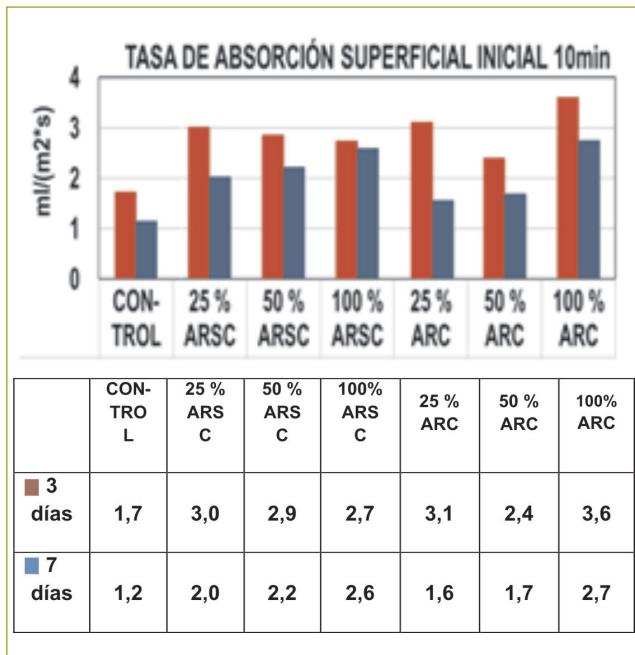


Figura 9. Gráfica del ensayo de ISAT a los 10 minutos, en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

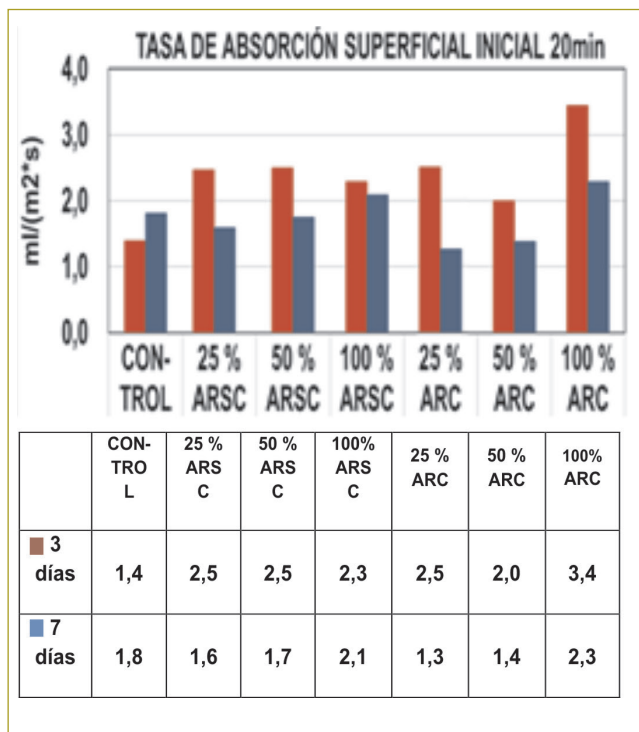


Figura 10. Gráfica del ensayo de ISAT a los 20 minutos, en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

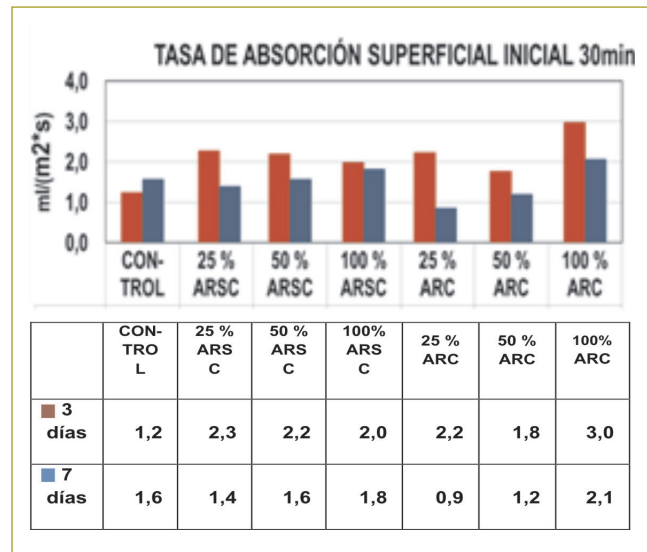


Figura 11. Gráfica del ensayo de ISAT a los 30 minutos, en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

Los menores resultados de tasa de absorción superficial registrados en las mezclas elaboradas con ARC pudieron haber sido causados por la formación de productos de carbonatación en los ARC, que ejercen un efecto de llenado en el sistema de poros, disminuyendo la absorción superficial inicial de la mezcla de mortero.

### Ensayo de sortividad

A renglón seguido se indican los valores de sortividad, de las diferentes mezclas, a los tres y siete días (figuras 12, 13 y 14).

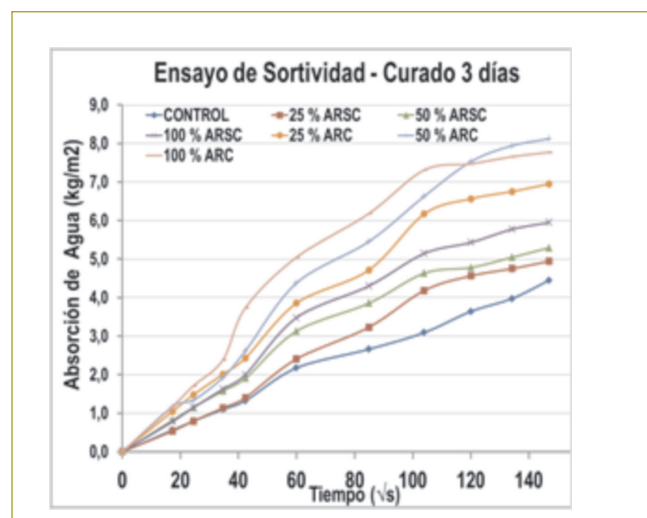
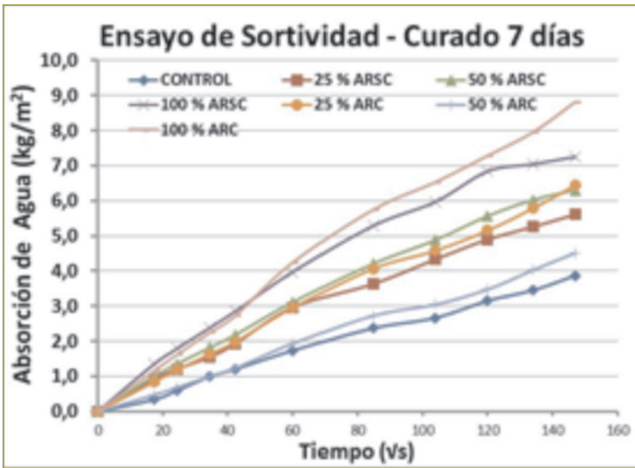


Figura 12. Gráfica del ensayo de sortividad en las mezclas de mortero ensayadas a los tres días.

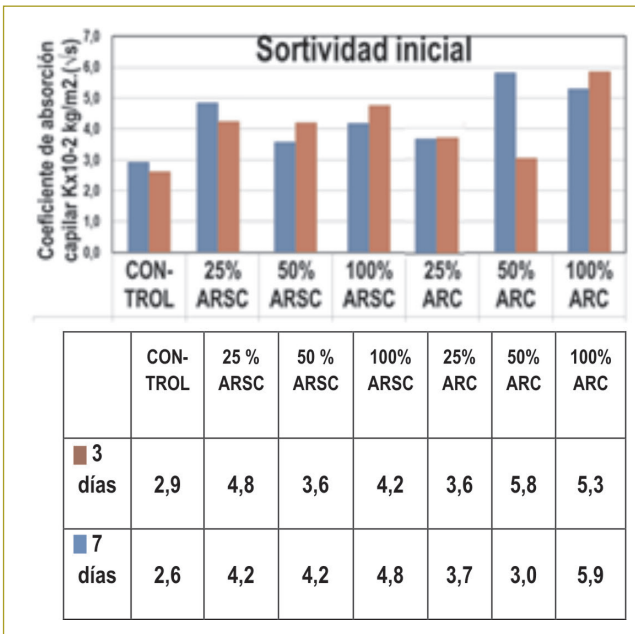




**Figura 13.** Gráfica del ensayo de sortividad en las mezclas de mortero ensayadas a los siete días.

Se observa que todas las mezclas elaboradas con agregados reciclados presentan valores superiores a la tasa de sortividad registrada en la mezcla control, ensayada a los tres y siete días.

Aunque se observa un ligero mejoramiento en la tasa de sortividad de las mezclas de mortero preparadas con agregados reciclados carbonatados, con sustituciones de 25 y 50 %, los valores reportados son significativamente superiores a los de la mezcla control, evaluada a los siete días, con porcentajes mayores de 43,8 y 15,4 %, respectivamente.



**Figura 14.** Gráfica del ensayo de sortividad en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

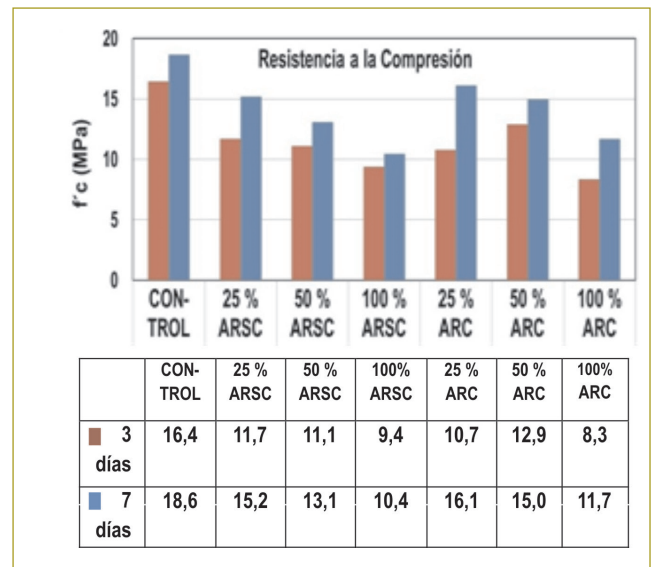
Los elevados valores de sortividad reportados en todas las mezclas preparadas con agregados reciclados, tanto carbonatados como no carbonatados, posiblemente son ocasionados por los altos porcentajes de absorción que presentan los agregados reciclados, en comparación con la arena natural (tablas 3 y 4).

Sin embargo, cabe señalar que el proceso de carbonatación acelerada mejoró los valores de sortividad de los agregados reciclados, en comparación con los no carbonatados. Se puede observar que los valores de sortividad de las mezclas 25 % ARC y 50 % ARC fueron 23,8 y 28,6 % menores que los registrados por las mezclas 25 % ARSC y 50 % ARSC (figuras 13 y 14).

### Ensayo de resistencia a la compresión

En la figura siguiente se indican los valores de resistencia a la compresión de las mezclas elaboradas con ARC y ARSC, a los tres y siete días (figura 15).

Se observa en todas las edades de ensayo que la resistencia a la compresión de las mezclas preparadas con ARC y ARSC fueron inferiores a la resistencia de la mezcla control. Aunque las resistencias a la compresión a los siete días, de las mezclas elaboradas con AR carbonatados, 25 % ARC, 50 % ARC y 100 % ARC, fueron 5,9, 12,7 y 10,8 % mayores que las resistencias de las mezclas de mortero preparadas con AR sin carbonatar, 25 % ARSC, 50 % ARSC y 100 % ARSC, respectivamente.



**Figura 15.** Gráfica del ensayo de resistencia a la compresión en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

La mezcla de mortero elaborada con agregados reciclados finos (AR), que obtuvo la mayor resistencia, corresponde a la muestra preparada con 25 % de AR carbonatados, registrando una resistencia a la compresión, a los siete días, de 16,1 MPa; sin embargo, este valor es 13,6 % inferior a la resistencia de la mezcla control.

También se observa que remplazar del todo el agregado natural por agregado reciclado disminuye dramáticamente el desempeño mecánico de las mezclas de mortero. Las mezclas 100 % ARC y 100 % ARSC reportaron resistencias, a los siete días, 37,1 y 44,1 % menores que la mezcla control.

El mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas de mortero elaboradas con ARC, en relación con las mezclas confeccionadas con ARSC, se puede atribuir a que la reacción de carbonatación y los productos generados por ésta ocasionan cambios complejos en el sistema poroso del mortero viejo adherido al agregado reciclado, acompañados con una mayor densificación, disminución de la absorción, porosidad y permeabilidad (Shu & Pen-Chi, 2012; Kou, Zhan & Poon, 2014).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los valores de propiedades mecánicas y de durabilidad de las muestras de mortero elaboradas con ARC fueron superiores a los de los morteros con ARSC y ligeramente menores que las obtenidas con la mezcla control. El mejor desempeño mecánico y estructural de las mezclas de mortero elaboradas con agregados finos reciclados se logró al remplazar la arena natural por 25 % de ARC.

Los resultados experimentales inducen a pensar que la carbonatación acelerada de los agregados finos reciclados densifica el mortero adherido al agregado, presentando una significativa reducción en el porcentaje de absorción de agua y aumentando la densidad.

Así, el enfoque propuesto en esta investigación se convierte en una alternativa sinérgica y novedosa, que contribuye al cerramiento del ciclo de carbono de la industria de concreto, al captar y fijar CO<sub>2</sub> en la estructura interna de los materiales reciclados, contrarrestando los impactos del cambio climático. Además, las reacciones generadas en el material debido al proceso de carbonatación mejoran su desempeño durable y mecánico,

convirtiendo esta técnica en una atractiva herramienta de valorización de los productos de desecho de la construcción, estimulando su aplicación práctica.

Adicionalmente, en virtud de que por medio del reciclaje se preservan los recursos naturales no renovables, al utilizar materiales con menor energía incorporada se emiten menos emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente, contribuyendo aún más a la mitigación del cambio climático.

Como el proceso de carbonatación acelerada de los ARC demostró beneficios mecánicos y de durabilidad, en comparación con los ARSC, se recomienda hacer estudios a mayores edades que verifiquen la influencia que tienen los productos de carbonatación en el comportamiento mecánico y de durabilidad, no sólo en los agregados reciclados finos, sino también en los agregados reciclados gruesos, mediante la elaboración de mezclas de concreto.

Además, se recomienda optimizar las condiciones del ensayo para permitir una mayor carbonatación en los agregados reciclados, teniendo en cuenta algunas de las siguientes variables:

- Condiciones del proceso de carbonatación: tiempo de exposición, temperatura, presión, humedad relativa.
- Condiciones de los materiales: tamaño de partículas, relación agua/cemento, contenido de humedad, tipo de cementante, un rango más amplio de porcentajes de remplazo.

## REFERENCIAS

- Aimaro, S. et al. (2012). Waste materials for carbon capture and storage by mineralisation (CCSM) - AUK perspective. *Applied Energy*, 99, 545-554.
- Airaksinen, M. & Matilainen, P. (2011). A carbon footprint of an office building. *Energies*, 4, 1197-1210.
- Baojian, Z., Poon, C. & Shi, Q. (2013). Experimental study on CO<sub>2</sub> curing for enhancement of recycled aggregate properties. *Construction and Building Materials*, 44, 1-5.
- 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. *Prog Energy Combust*, 38, 302-320.
- Cement Technology Roadmap, Carbon emissions reductions up to 2050 (2009). International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development, p. 36. Date accessed sept. 13, 2011, [http://www.wbcsd.org/DocRoot/mka1EKor6mqL-Vb9w903o/WBCSD-IEA\\_CementRoadmap.pdf](http://www.wbcsd.org/DocRoot/mka1EKor6mqL-Vb9w903o/WBCSD-IEA_CementRoadmap.pdf).

- Collins, F. (2010). Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. *Int. J. Life Cycle Assess*, 15, 549–556.
- Deyu, K., Ting, L., Jianjun, Z., Chengchang, M., Jun, J. & Jing, J. (2010). Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24, 701–708.
- Dosho, Y. (2007). Development of a sustainable concrete waste recycling system – application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing Method. *J Advanced Concrete Technology*, 5(1), 27–42.
- Engelsen, C., Mehus, J. & Pade, C. (2005). Carbon Dioxide Uptake in Demolished and Crushed Concrete, Tech. Rep. Oslo: Norwegian Building Research Institute.
- Ensayos de laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería (ECI) (2014).
- Erin, R. et al. (2012). Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 302–320.
- Fernández, B., Simons, S., Hills, C., & Carey, P. (2004). A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>. *Journal of Hazardous Materials B112*, 193–205.
- García, C., et al. (2008). New insights on the use of supercritical carbon dioxide for the accelerated carbonation of cement pastes. *J. of Supercritical Fluids*, 43, 500–509.
- Guggemos, A. & Horvath, A. (2005). Comparison of environmental effects of steel and concrete-framed buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, 11 (008), 93–101.
- Hasanbeigi et al. (2012). Emerging energy-efficiency and CO<sub>2</sub> emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6220–6238.
- Huijgen, W., Ruijg, G., Comans, R. & Witkamp, G. (2006). Energy consumption and net CO<sub>2</sub> sequestration of aqueous mineral carbonation. *Industry Engineering Chemistry*, 45, 9184–9194.
- Jonsson, G. & Wallevik, O. (2005). Information on the use of concrete in Denmark, Sweden, Norway and Iceland, Tech. Rep. Reykjavik: Icelandic Building Research Institute.
- Katz, A. (2004). Treatments for the improvement of recycled aggregate. *J Mater Civil Eng*, 16(6), 597–603.
- Kawano, H. (2000). Barriers for sustainable use of concrete materials, Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century. London/New York: E & FNSpon.
- Khatib, J. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement & Concrete* 2005, 35, 763–769.
- Kosmatka, S. et al. (2002). Design and control of concrete mixtures. Cement Association of Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 7.
- 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. (2014). Use of a CO<sub>2</sub> curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 45, 22–28.
- Kou, SC., Zhan, B.J. & Poon, C.S. (2012). Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction Build Mater*, 28, 549–556.
- Lagerblad, B. (2005). Carbon Dioxide Uptake During Concrete Life Cycle: State of the Art, Tech. Rep, Swedish Cement and Concrete Research Institute, de www.cbi.se.
- Li, G., Xie, H. & Xiong, G. (2001). Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders. *Cement and Concrete Composites*, 23, 381–387.
- Li, W. (2002). Composition Analysis of Construction and Demolition Waste and Enhancing Waste Reduction and Recycling in Construction Industry in Hong Kong, Department of Building and Real Estate. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University.
- Liu, Q., Xiao, J., & Sun, Z. (2011). Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Cement Concrete*, 41, 1050–1057.
- Méndez, S. (2011). Aprovechamiento de escombros: una oportunidad para mejorar la infraestructura de las comunidades marginadas. II Conferencia Internacional “Gestión de Residuos en América Latina (GRAL)”.
- Montgomery, D.G. (1998). Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate. In R.K. Dhir, N.A. Henderson, M.C. Limbachiya (eds.). *Proceedings of international symposium: sustainable construction: use of recycled concrete aggregate*. London: Thomas Telford, 289–296.
- Olorunsogo, F.T. & Padayachee, N. (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitoring by durability indexes. *Cement and Concrete Research*, 32, 179–185.
- Pinzón, A. (2013). Formulación de lineamientos para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá. Trabajo de tesis de grado. Especialización en planeación ambiental y gestión integral de los recursos naturales. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Poon, C. & Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *ResourConservRecycl*, 50, 293–305.
- Ravindrarajah, R.S. & Tam, T.C. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37.
- Rehan, R. & Nehdi, N. (2005). Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. *Environmental Science & Policy*, 8(2), 105–114.
- Report: Construction Materials Recycling Association. Concrete Recycling.org. (2013).
- Report: European Aggregates Association (2012). *Annual review 2011–2012*. Brussels, Belgium.
- Resolución 2397 de 2011 (abril 25), Por la cual se regula técnicamente el tratamiento o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital, artículo 4.
- Roussat, N., Dujet, C. & Méhu, J. (2009). Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis. *Waste management*, 29(1), 12–20.
- Roy, S. & Poh, K. (1999). Northwood. Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies, *Build. Environ*, 34, 597–606.
- Shu, E. & Pen-Chi, C. (2012). CO<sub>2</sub> Capture by Accelerated Carbonation of Alkaline Wastes: A Review on Its Principles and Applications. *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 22.
- Tam, V. et al. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources. Conservation. Recycling*, 50(1), 82–101.
- Tateyashiki, H. et al. (2001). Properties of concrete with high quality recycled aggregate by heat and rubbing method. *ProcCI*, 23(2), 61–66.
- Tomosawa, F. & Noguchi, T. (2000). *New technology for the recycling of concrete—Japanese experience*. Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century. London/New York: E & FNSpon, 274–287.
- Urge, D. (2007). Climate change mitigation in the building sector: the findings of the 4th Assessment report of the IPCC. Center for climate change and sustainable energy policy, 38.
- Van, O. & Padovani, A. (2003). Cement manufacture and the environment. Part II: Environmental challenges and opportunities. *J Ind Ecol*, 7(1): 93–126.

Villamizar, L. (marzo-mayo de 2014). *Revista Ingeniería y Tecnologías*. Construcción, otro sector en la onda verde, 12-13.

Yamasali, A. (2003). An overview of CO<sub>2</sub> mitigation options for global warming – emphasizing CO<sub>2</sub> sequestration options. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 36(4), 361-375.

Zhonghe, S. et al. (2008). Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 22, 1723–1729.



# Redes de energía eléctrica inteligentes: perspectivas en los contextos nacional e internacional

Smart electrical grids: Perspectives in the national and international contexts

PAULA RÍOS REYES - RICARDO MORENO CHUQUEN - DANIEL GONZÁLEZ TRISTANCHO  
- EMMY YADIRA RUIZ VARGAS - HUGO IVÁN FORERO BERNAL

Profesores de planta del Programa de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

paula.rios@escuelaing.edu.co - ricardo.moreno@escuelaing.edu.co - daniel.gonzalez@escuelaing.edu.co -  
emmy.ruiz@escuelaing.edu.co - hugo.forero@escuelaing.edu.co

Recibido: 07/04/2015 Aceptado: 14/08/2015

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

## Resumen

La transición del sector de la energía eléctrica a escala global está impulsada por diversos aspectos tecnológicos, económicos y medioambientales. En el ámbito tecnológico, el desarrollo rápido de tecnologías de las comunicaciones, el control y la información permiten llevar a cabo operaciones de tiempo real en las redes de transmisión y distribución de electricidad. La competencia en mercados de energía eléctrica está impulsando la creación de diferentes tipos de mercados, entre éstos los servicios auxiliares de energía eléctrica. En este contexto de transformación, en cuyo centro se hallan las redes inteligentes de energía, se destaca el tema del cambio climático, que está impulsando nuevas políticas energéticas relacionadas directamente con los sistemas de potencia. En la actualidad, expertos en el tema coinciden en afirmar que las redes inteligentes están modificando las redes actuales a un nuevo paradigma de operación y servicio; en este sentido, nuevos recursos distribuidos, como generación dispersa de energía con fuentes no convencionales, almacenaje de energía e integración de vehículos eléctricos, modifican la operación tradicional de los sistemas de potencia. En el contexto colombiano, el año pasado se aprobó la Ley 1715 de 2014 sobre la integración de energías renovables en el sistema interconectado nacional, que fijaría la base regulatoria para la integración efectiva de las redes inteligentes en el sistema eléctrico colombiano. En este artículo se hace un análisis de perspectivas, retos y oportunidades de las redes inteligentes en la transición de los sistemas de electricidad.

**Palabras claves:** redes inteligentes, respuesta de la demanda, almacenaje de energía eléctrica.

## Abstract

The transition of the electrical energy sector worldwide is being propelled by diverse technological, economical, and environmental aspects. In the technological field, the rapid development of communication, control, and information technologies allows to carry out real time operations in the electrical transmission and distribution grids. Competition in the electrical energy market is promoting the creation of different types of markets, among them the auxiliary services of electrical energy. Within this transformation context, being smart electrical grids at its core, climate change plays a relevant role, which is encouraging new energy policies directly related with power systems. Currently, experts in this field agree on stating that smart grids are transforming current grids into a new paradigm of operation and service; in this sense, new distributed resources, such as dispersed energy generation from unconventional sources, energy storage, and integration with electric vehicles, modify the traditional operation of power systems. In the Colombian context, Law 1715 of 2014 was approved, which deals with the integration of renewable energies in the national interconnected system; this would establish the regulations for an effective integration of smart grids in the electrical Colombian system. This article makes an analysis of the perspectives, challenges, and opportunities of smart grids in the transition stage of electrical systems.

**Keywords:** smart grids; demand response; electrical energy storage.

## INTRODUCCIÓN

Los crecientes requerimientos de la sociedad por energía eléctrica en un entorno sostenible, junto con el rápido desarrollo de nuevas tecnologías digitales, están transformando el sector eléctrico. La red de transmisión y distribución de energía actual requiere transformarse en una red que integre tecnologías de la información y de las comunicaciones, con el objetivo de suministrar energía de manera eficiente y operativamente segura en un entorno de sostenibilidad.

Durante los últimos años el concepto de red de energía eléctrica inteligente ha merecido amplia discusión en los ámbitos industrial, gubernamental y académico. A escala industrial, cada agente en la cadena *generación-transmisión-distribución* se ha apropiado del concepto según las perspectivas del sector que representa y algunas empresas se muestran interesadas en función de los beneficios económicos que la aplicación del concepto de red inteligente pueda representar. Esta visión está centrada en la integración de tecnologías que agreguen valor a las redes eléctricas existentes, lo cual se refleja directamente en la eficiencia y, por tanto, en mayores niveles de utilidad neta en la prestación del servicio de energía eléctrica.

Por otro lado, el concepto de red inteligente ocupa un espacio en la agenda gubernamental a través de las agencias de planeación y regulación de cada país (si cuentan con esquemas liberalizados). El espacio que ocupa el concepto de red inteligente depende de las condiciones inherentemente energéticas de cada país. Por ejemplo, algunos países de Europa han iniciado planes energéticos dirigidos a reducir los niveles de emisión de CO<sub>2</sub>, incrementar la seguridad del abastecimiento de energía y remplazar la tecnología existente de generación por tecnología basada en recursos renovables, algunas de estas iniciativas han sido anunciadas en el contexto de redes inteligentes, mientras que en Estados Unidos la agencia de regulación FERC (Federal Energy Regulatory Commission) ha lanzado en los últimos años varias órdenes (745, 767, 764, 661) para regular tanto la integración de energías renovables en los mercados de energía eléctrica como la remuneración por estrategias de respuesta de la demanda. Todo lo anterior en el contexto de redes inteligentes.

Durante los últimos años la academia, a través de la ingeniería eléctrica, ha contribuido en la investigación sobre redes inteligentes de forma entusiasta y auspiciada

principalmente por recursos públicos que incentivan la investigación en redes de energía eléctrica inteligente. La gran cantidad de información producida ha dado lugar a la creación de revistas especializadas en *smart grids*. En este sentido, grupos de investigación de universidades internacionales han iniciado proyectos piloto demostrativos de microrredes CC (de corriente continua) en los campus universitarios con la posibilidad de operar en modo aislado o con capacidad de suministrar energía en la red de distribución local.

En este artículo se presenta el contexto internacional acerca del concepto de red de energía eléctrica inteligente y su impacto en la operación y en los mercados de energía eléctrica. La parte final del artículo discute la importancia de la Ley 1715 para la aplicación de redes inteligentes en Colombia. Esta ley, promulgada en el mes de mayo de 2014, puede representar las bases regulatorias y legislativas para incentivar la inversión en tecnologías asociadas al concepto de red de energía eléctrica inteligente en Colombia a mediano y largo plazo.

## CONTEXTO INTERNACIONAL DE REDES INTELIGENTES

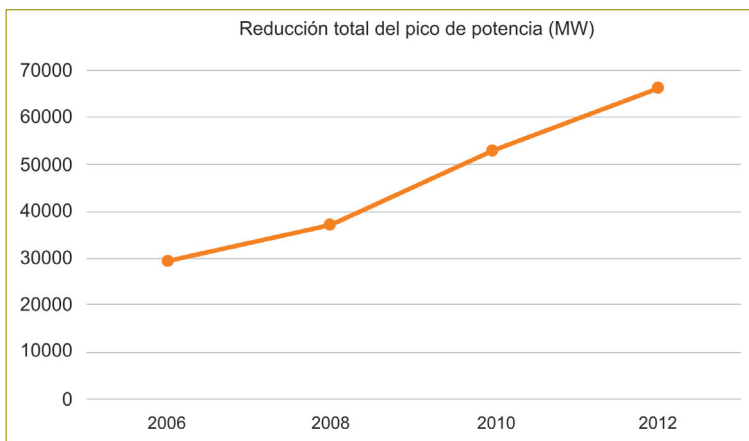
En algunos países (Estados Unidos, Inglaterra, España, entre otros) hay adelantos importantes en el concepto de red de energía eléctrica inteligente, en tres temas principalmente: regulación acerca de estrategias de respuesta de la demanda, integración del almacenaje de energía, y fuentes de energías renovables tanto en redes de distribución como en redes de transmisión.

## REGULACIÓN EN RESPUESTA DE LA DEMANDA

Desde el punto de vista de la demanda, la nueva red de energía eléctrica propiciaría (en algunos países ya es un hecho) la participación activa (respuesta de la demanda) de los usuarios de energía en los mercados de energía eléctrica. Las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) permitirían que los usuarios accedieran a información en tiempo real sobre el precio unitario de la energía eléctrica y con esta información tomar decisiones sobre el momento para consumir energía eléctrica. Incluso, si hay usuarios con plantas locales de generación (usualmente plantas fotovoltaicas) entonces podrían aportar energía eléctrica a la red con cierta tarifa de remuneración.

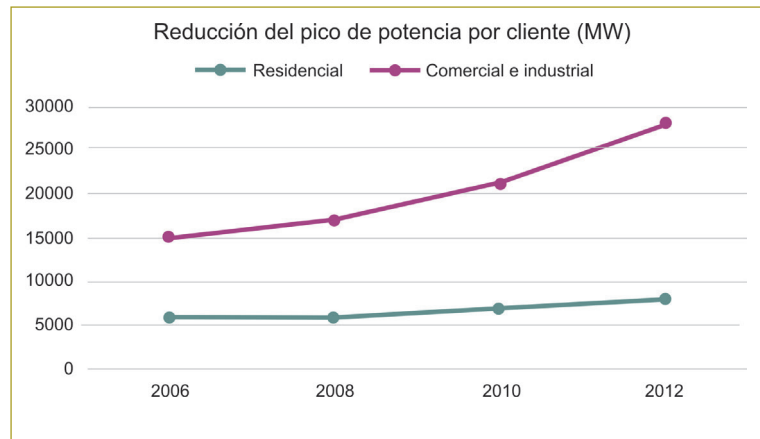
De esta manera, la respuesta de la demanda es uno de los recursos de energía más importantes en el contexto de las redes inteligentes. La activación del lado de la demanda representa la transformación de los usuarios en agentes que pueden modificar su consumo de energía en función de incentivos monetarios. La modificación de los patrones de consumo de los usuarios está encaminada principalmente a reducir los picos de demanda. La activación del lado de la demanda podría evolucionar hasta convertirse en un recurso para prestar servicios auxiliares a los operadores de distribución.

Las estrategias de la respuesta de la demanda permiten reducir los picos de la curva de demanda al incentivar cambios en el comportamiento de los patrones de consumo de los usuarios, promoviendo el consumo de energía a horas y/o temporadas en que la tarifa de energía eléctrica es menor. La experiencia internacional en el tema de respuesta de la demanda es importante, particularmente en Estados Unidos, donde se han implementado programas de respuesta de la demanda a través de reglas regulatorias fijadas por la FERC. La FERC presenta resultados de la reducción del pico de potencia demandada debido a estrategias de activación de la demanda en el reporte del año 2012 (*Report FERC*, 2012). La figura 1 muestra la reducción del pico de potencia demandada entre los años 2006 y 2012 (*Report FERC*, 2012) mientras que la figura 2 muestra la reducción del pico de demanda según el tipo de usuario (*Report FERC*, 2012).



**Figura 1.** Reporte de la reducción total del pico de potencia desde el 2006 hasta el 2012.

Fuente: *Report FERC*, 2012, p. 23.



**Figura 2.** Reporte de la reducción del pico de potencia según el tipo de cliente.

Fuente: *Report FERC*, 2012, p. 23.

El éxito de las estrategias de respuesta de la demanda está centrado en que el usuario desee participar activamente en éstas y que además cuente con las tecnologías digitales de la información que permitan tal participación de manera eficiente. Si el usuario tiene pleno conocimiento del precio de la energía, las estrategias basadas en incentivos financieros son potencialmente exitosas.

Las estrategias de respuesta de la demanda se suelen gestionar en varios programas que se clasifican en dos grandes grupos: programas basados en incentivos y programas basados en tiempo. La primera estrategia incentiva que los usuarios reduzcan el consumo de electricidad en horas de alta demanda, lo cual implica trasladar el consumo de energía a horas que usualmente son de baja demanda. Los participantes en este tipo de programas perciben no sólo un descuento en el precio final de sus facturas, sino también pueden llegar a recibir un incentivo monetario adicional. En Estados Unidos, la FERC en sus órdenes 727 y 728 sobre respuesta de la demanda (FERC, order 727 and order 728, 2008) define este tipo de estrategias en diferentes categorías resumidas a continuación:

- **Control directo de la carga.** En este programa, el operador de la red tiene la capacidad de desconectar de forma remota ciertos dispositivos conectados a ella como equipos de calefacción por un breve tiempo. Este tipo de programas son ofrecidos principalmente a clientes residenciales o pequeños comerciantes (FERC, order 727 and order 728).

- **Carga interrumpible.** Los participantes reciben un descuento en las facturas si reducen su carga a valores predefinidos con el operador del sistema. Este programa incluye penalizaciones si no se lleva a cabo la reducción acordada (FERC, order 727 and order 728).
- **Subasta/recompra de demanda.** Los clientes ofrecen restricciones para reducir los precios base de la electricidad en el mercado mayorista. Suelen ser ofrecidos a grandes clientes (FERC, order 727 and order 728).
- **Respuesta de la demanda en emergencia.** Este tipo de programas proporcionan incentivos monetarios a los clientes para que reduzcan la carga en periodos donde se presente déficit de reservas (FERC, order 727 and order 728).
- **Capacidad de mercado.** Los clientes ofrecen reducciones en la carga como capacidad del sistema para remplazar la generación convencional. Son informados con anterioridad sobre los días en que se van a presentar eventos especiales de sobre demanda para que activen sus cargas que actúan como pequeñas unidades generadoras; así mismo, reciben incentivos que consisten en pagos adelantados (FERC, order 727 and order 728).

En los programas con base en el precio se evalúan los cambios en el consumo de energía eléctrica por parte de los participantes ante cambios en los precios de sus facturas. Así, el consumo de energía se ve determinado por la estructura del precio, el cual varía para temporadas de precios altos y bajos. Además de que la participación en este tipo de programas es voluntaria, la FERC también ha clasificado estas categorías de respuesta de la demanda según las órdenes 727 y 728 de la siguiente manera:

- **Tarifas de periodo de utilización.** Es un programa que consiste en una tarifa diferenciada para diferentes periodos. Suelen estar definidas para las 24 horas del día (FERC, order 727 and order 728).
- **Precios en tiempo real.** Consiste en una tarifa en la que el precio de la electricidad suele fluctuar, reflejando cada hora los precios de la energía en el mercado mayorista y las contingencias de la red. Los usuarios son informados sobre los precios en tiempo

real generalmente con un día de anticipación (FERC, order 727 and order 728).

Por otra parte, los programas de respuesta de la demanda requieren un sistema que registre y almacene el consumo de energía eléctrica y ofrezca las mediciones en el punto de recolección de datos para que desde allí se haga la gestión de la demanda. Este sistema supone toda una infraestructura de medición avanzada (AMI, *Advanced Metering Information*).

En el centro de control se concentra toda la información del consumo de la demanda —cuánto y cómo—, y dependiendo de estas cifras, se realiza el control sobre la carga. Para ello se requiere un *software* de medición y control de datos que provea al operador del sistema de datos confiables y actualizados de la demanda, incluyendo información sobre el flujo de energía. En el caso de que se trate de programas en tiempo real, el centro de control o el operador del sistema proveerá a los usuarios de información acerca de los pronósticos sobre el consumo de energía y las tarifas para las próximas horas.

## INTEGRACIÓN DEL ALMACENAJE DE ENERGÍA EN LAS REDES ELÉCTRICAS

Los sistemas de almacenamiento de energía son una de las soluciones flexibles al problema de la disparidad temporal entre el suministro y la demanda de energía en el contexto de las redes de energía eléctrica inteligentes. El desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía descentralizado soportaría el desarrollo masivo de generación distribuida. Así mismo, el almacenaje de energía podría proveer un rango de aplicaciones y servicios a los operadores de los sistemas de distribución.

Aunque en principio hay varias tecnologías de almacenamiento de energía, incluidos los reservorios de agua en centrales hidroeléctricas, los sistemas de almacenamiento en el contexto de redes de energía eléctrica inteligentes están centrados en tecnologías basadas en baterías, que varían según el componente químico utilizado y que se fundamentan en el principio de reacciones electroquímicas de reducción y oxidación, mediante las cuales se transportan electrones a los electrodos. La principal característica de las baterías consiste en la alta densidad de energía, pero presentan limitaciones en cuanto al ciclo de vida útil y al costo



de los materiales utilizados. Entre los tipos de baterías más utilizadas están las baterías de ácido de plomo, de níquel e hidruro metálico, ion de litio y litio-polímero.

Los sistemas descentralizados de almacenaje podrían impactar la administración de la red de distribución en diferentes áreas funcionales, entre éstas la administración de operación de la red, los sistemas de servicios y el negocio por utilidades de los operadores de red. Específicamente, en el tema de la administración de la red de distribución, la integración de almacenaje desacopla la operación de suministro y consumo instantáneo de energía eléctrica, incluyendo la opción de facilidades de almacenaje que pueden ser despachadas para suministrar energía. Por otro lado, en cuanto al tema de provisión de servicios, las facilidades de almacenaje de energía podrían aumentar la calidad del servicio (regulación de voltaje, corrección del factor de potencia, entre otros), y aumentar la seguridad por la provisión de energía de respaldo. El recurso de almacenaje de energía podría participar activamente en los mercados de energía.

Las tecnologías de almacenaje de energía instaladas dentro de las redes de media y baja tensión pueden proveer un rango amplio de funciones y capacidades para soportar y optimizar la operación de las redes de distribución. Sin embargo, actualmente hay muy pocas indicaciones para guiar la integración de almacenaje de energía descentralizado en las redes de distribución, lo cual podría generar incertidumbre entre operadores de sistemas de distribución y operadores de almacenaje, si no existen acuerdos necesarios entre actores de servicios de energía en varios temas, tales como conexión de las facilidades de almacenaje y derechos de acceso a las redes.

Las tecnologías de almacenaje de energía han demostrado capacidades únicas para afrontar algunas características críticas en la operación de los sistemas de potencia. El almacenaje de energía eléctrica tiene el potencial para convertirse en una tecnología emergente, indispensable para la integración de energías renovables y lograr metas de reducción de CO<sub>2</sub>.

El almacenamiento de energía puede tener tres roles en los sistemas de potencia de energía eléctrica. El primer rol consiste en la reducción de los costos de la energía por el almacenaje en periodos de baja demanda, donde el precio de mercado es menor, y luego usar la energía en periodos de alta demanda. Otro rol de la

integración del almacenaje de energía en los sistemas de potencia consiste en la mejora en confiabilidad en el suministro de energía, dado que podrían respaldar a los sistemas en caso de fallas no esperadas en el sistema. El tercer rol de la integración del almacenaje de energía en los sistemas de potencia consiste en proveer servicios auxiliares, como regulación de voltaje y frecuencia.

## RETOS EN LA INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

Desde el punto de vista de la generación de energía eléctrica, el cambio de la red actual en una nueva red que cumpla con criterios de sostenibilidad está dado en función del remplazo de fuentes convencionales de energía (recurso primario: gas, diésel, carbón, fusión nuclear) por fuentes no convencionales de energía (recurso primario: radiación solar, velocidad del viento, entre otras). Los planes energéticos encaminados a la integración de fuentes de energía no convencional están creando retos económicos, operativos y regulatorios. En términos económicos, las fuentes no convencionales de energía compiten en mercados de energía dominados por fuentes basadas en recursos convencionales no renovables. En términos de operación, los retos se presentan debido a la naturaleza volátil e intermitente de los recursos renovables (radiación solar, velocidad del viento, entre otros). Estos retos pueden ser direccionados a través del almacenamiento de energía a gran escala. De hecho, el almacenamiento de energía eléctrica es un tema clave para la transición de la red actual hacia una red de energía eléctrica inteligente.

## CONTEXTO NACIONAL DE REDES INTELIGENTES

Se destaca el hecho de que actualmente el Ministerio de Minas y Energía, junto con las entidades de planeación energética (UPME) y la entidad de regulación de energía y gas (CREG), así como representantes del sector eléctrico, están en el proceso de definición de las reglas que la Ley 1715 aprobaba en mayo de 2014. Esta ley establece el marco legal y los instrumentos para la promoción, desarrollo y utilización de las fuentes no convencionales de energía (FNCE) en el Sistema Interconectado Nacional mediante su integración al mercado eléctrico. Así mismo, crea los mecanismos regulatorios para la remuneración de la aplicación de la respuesta de la demanda.

El artículo 2 de la Ley 1715 de 2014 establece que “le corresponde al Estado colombiano, representado por las entidades relacionadas, que se desarrollen programas y políticas para asegurar el impulso y uso de mecanismos de fomento de la gestión eficiente de la energía, así como la penetración de las fuentes no convencionales de energía en la canasta energética colombiana”. De esta manera, se expedieron dos decretos en diciembre de 2014: el 2 de diciembre de 2014 se firmó y publicó el Decreto 2469, que determina los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración, mientras que el 3 de diciembre de 2014 se publicó el Decreto 2492, que adopta disposiciones en materia de implementación de mecanismos de respuesta de la demanda.

El Decreto 2469 contiene cinco artículos. El primero dispone condiciones de simetría de participación en el mercado mayorista entre los generadores y autogeneradores a gran escala. El segundo artículo menciona que debe crearse y firmarse un contrato de respaldo entre los autogeneradores a gran escala y el operador de red o transportador. El artículo tercero afirma que la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) debe establecer el límite mínimo de autogeneración a gran escala. El artículo cuarto fija los parámetros que serán utilizados para otorgar la naturaleza de autogenerador a un generador. El artículo quinto menciona que el Decreto 2469 rige a partir de la fecha de firma. En el momento en que se escribe este artículo, las entidades de regulación y planeación cuentan con máximo seis meses para expedir la reglamentación de los artículos mencionados (Decreto 2469 de 2014).

El Decreto 2492 contiene cinco artículos acerca de disposiciones para la implementación de la respuesta de la demanda. El artículo primero dispone que la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) debe incluir esquemas de remuneración para la gestión eficiente de la energía. El artículo segundo dispone que la UPME debe considerar criterios de respuesta de la demanda en los planes de expansión. El artículo tercero es clave en el contexto de redes inteligentes, dado que menciona que la CREG debe diseñar los mecanismos necesarios para que los usuarios voluntariamente puedan ofertar reducciones o desconexiones de demanda en el mercado mayorista con el objetivo de dar confiabilidad al Sistema Interconectado Nacional (SIN). El artículo cuarto modifica el artículo tercero

del Decreto 388 de 2007 en cuanto a la conformación de áreas de distribución (ADD) y cargos por uso únicos por nivel de tensión de suministro y hora del día. El artículo quinto menciona que el Decreto 2469 rige a partir de la fecha de firma. A la fecha, las entidades de regulación y planeación cuentan con máximo doce meses para expedir la reglamentación de los artículos mencionados (Decreto 2469 de 2014).

## CONCLUSIONES

Las redes de energía están experimentando una transformación definitiva hacia una nueva generación de redes de energía eléctrica inteligentes que utilizan tecnologías digitales de la información y las comunicaciones. La integración de nuevos recursos energéticos como respuesta a la demanda, almacenaje de energía y fuentes de energías no convencionales genera nuevas perspectivas en la operación y en los mercados de energía eléctrica. De esta manera, la respuesta a la demanda activa la participación de los usuarios en los mercados de energía, ofreciendo desde servicios simples como desconexión de carga, hasta la entrega de energía a la red de distribución local. En algunos países las estrategias de respuesta a la demanda están reguladas y operan satisfactoriamente en un contexto de competencia. En Estados Unidos, las órdenes regulatorias 727 y 728 han creado un sistema de reglas e incentivos para la participación de los usuarios en los mercados de energía.

Las perspectivas de la aplicación de redes de energía eléctrica inteligentes en Colombia están ligadas estrechamente a la Ley 1715 de 2014 y a los decretos 2469 y 2492, que estipularán las disposiciones regulatorias para la implementación de mecanismos de respuesta de la demanda y los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración. Resoluciones posteriores, que se publicarán durante el primer tercio de 2015, definirán la metodología para determinar la energía firme de plantas eólicas.

La Ley 1715 podrá representar un precedente importante en la operación de la red de energía eléctrica en Colombia, ya que permitiría la integración de tecnologías denominadas redes inteligentes y que han sido presentadas en este artículo. La reglamentación de la actividad de autogeneración a gran escala en el SIN incrementaría la oferta de energía en un entorno

de competencia. Más importante aún, incentivaría la inversión en fuentes no convencionales de energía, impulsando la penetración de estas fuentes en la canasta energética colombiana.

El marco regulatorio que actualmente están construyendo la CREG y la UPME, lideradas por el Ministerio de Minas y Energía desempeñará un papel clave en la transformación del sector eléctrico en uno que cuente con redes de energía eléctrica inteligentes.

## REFERENCIAS

- Federal Energy Regulatory Commission (FERC) (2012). Report: *Assessment of Demand Response and Advanced Metering*.
- Federal Energy Regulatory Commission (FERC) (2008). Report: 727 and 728: Federal Energy Regulatory Commission survey on Demand Response, Time-Based Rate Programs/Tariffs and Advanced Metering Infrastructure.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2011). *Electrical Energy Storage, white paper*.
- Ley 1715 de 2014, Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.
- Decreto 2469 de 2014, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia.
- Decreto 2492 de 2014, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia.





# Ensayos para valorar los agregados pétreos destinados a la construcción de los pavimentos asfálticos de las carreteras nacionales. Compendio para *dummies*

Evaluation tests of aggregates in the construction of the national highway asphalt pavements. Abstract for dummies.

FERNANDO SÁNCHEZ SABOGAL

Ingeniero civil.

elexdos@gmail.com

Recibido: 14/04/2015 Aceptado: 20/08/2015

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

## Resumen

En este artículo se describe el propósito de los ensayos incluidos en las especificaciones generales de construcción de carreteras del Inviás para valorar la calidad de los agregados pétreos destinados a la construcción de subbases y bases granulares y mezclas de concreto asfáltico.

**Palabras claves:** agregados, llenante mineral, concreto asfáltico, ensayos, especificaciones, Instituto Nacional de Vías.

## Abstract

This document describes the purpose of the tests used to determine the quality of aggregates for granular subbases and bases and asphalt concrete mixes included in the Inviás standard specifications for highway construction.

**Keywords:** aggregates, filler, asphalt concrete, tests, specifications, Instituto Nacional de Vías.

## INTRODUCCIÓN

Las características de los agregados minerales empleados en la construcción de un pavimento asfáltico tienen influencia decisiva sobre el comportamiento de éste. Para elegir correctamente los agregados, el ingeniero debe saber cuáles han de ser sus propiedades fundamentales, tomando en cuenta la importancia de la carretera y el tipo de tránsito que va a hacer uso de ella, las condiciones ambientales (en particular en lo relacionado con la temperatura, las lluvias y la humedad), las capas del pavimento en las cuales se van a utilizar y, por último, la naturaleza y las propiedades de los materiales de construcción disponibles en la zona del proyecto.

Las especificaciones generales de construcción de carreteras fijan las características y condiciones que deben cumplir los agregados para la construcción de pavimentos, sin entrar a tratar las peculiaridades de cada obra, las cuales deben quedar reflejadas en especificaciones particulares.

Con el fin de eliminar la subjetividad y los conflictos que inevitablemente se derivan de ella, la ingeniería de carreteras ha venido adoptando a lo largo del tiempo unos ensayos normalizados de laboratorio, a partir de cuyos resultados se decide la aceptación o el rechazo de los materiales propuestos para la construcción de las capas de un pavimento. La idea es que los resultados de estas pruebas sean indicadores *a priori* del comportamiento real de los materiales en servicio, aunque, justo es reconocerlo, no en todos los casos ha sido posible establecer correlaciones incuestionables entre los resultados de las pruebas y el comportamiento en servicio del producto final.

Más adelante se resumen los ensayos dispuestos en las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías para el control de la calidad de los agregados por emplear en la construcción de subbases y bases granulares y de mezclas de concreto asfáltico (tabla 1), capas estas que componen la mayoría de los pavimentos construidos en Colombia (ref. 1). Se puede apreciar que las características fundamentales que ordenan verificar las especificaciones son la resistencia a la fragmentación, al pulimento y al intemperismo, la limpieza, la forma, la angulosidad, la granulometría, el valor soporte de los materiales para las capas granulares y la adhesividad de los agregados previstos para mezclar con el asfalto.

Los ensayos relacionados en la tabla se deben complementar con el conocimiento de la composición

mineralógica de los agregados, la cual tiene un efecto significativo sobre las características físicas y químicas que, en últimas, gobiernan el comportamiento de las capas de pavimento. Por ejemplo, los agregados de tipo calcáreo –calizas y dolomitas–, si bien presentan una excelente adherencia con los ligantes asfálticos, suelen mostrar una resistencia menor a la degradación de sus partículas y al pulimento que los agregados graníticos. Además de lo anterior, el proceso de manufactura de los agregados incide también sobre su calidad y comportamiento, aspecto éste que por lo general sólo se puede conocer debidamente durante la etapa de producción.

La toma de muestras es tan importante como los mismos ensayos y, por lo tanto, los encargados de hacerla deben adoptar las precauciones necesarias para obtener muestras que indiquen la verdadera naturaleza y las características reales de los materiales representados por ellas, tal como se indica en la norma INV E-201. En este punto se debe tener en cuenta que, en la mayoría de las fuentes de materiales, las propiedades de éstos presentan variaciones considerables en diferentes instantes en la misma fuente o aun en el mismo instante en diferentes puntos de ella. Por tal razón, la verificación regular de la calidad de los agregados es una condición básica para asegurar la calidad de los productos elaborados con ellos. Las instrucciones contenidas en las especificaciones de construcción en relación con la frecuencia del muestreo y de los ensayos persiguen ese objetivo.

## DUREZA Y TENACIDAD

Los ensayos incluidos en este grupo pretenden evaluar el desgaste del agregado debido a la fricción y a la fragmentación a causa de solicitaciones exteriores, como las producidas por su manejo y puesta en obra o las provocadas por el tránsito, cuya consecuencia es una modificación de la granulometría, aumentando la proporción de partículas de menor tamaño y, consecuentemente, modificando también las propiedades relacionadas con ella<sup>1</sup>. El fenómeno es aún más perjudicial si los finos

1. En el ensayo para determinar el coeficiente de pulimento acelerado (CPA) solamente se evalúa el desgaste del agregado debido a la fricción generada sobre él por la acción combinada de una rueda y unos materiales abrasivos normalizados.

Tabla 1

Ensayos especificados por el Invías para verificar las características de los agregados pétreos destinados a la construcción de pavimentos asfálticos en las carreteras nacionales<sup>2</sup>

Característica	Norma de ensayo INV	Subbase granular	Base granular	Concreto asfáltico
<b>Dureza y tenacidad</b>				
Degradación por abrasión e impacto Los Ángeles	E-218	X	X	X
10 % de finos	E-224		X	X
Degradación del agregado grueso por abrasión micro-Deval	E-238	X	X	X
Coefficiente de pulimento acelerado	E-232			X
<b>Resistencia al intemperismo</b>				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de sodio	E-220	X	X	
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio	E-220	X	X	X
<b>Limpieza</b>				
Límite líquido	E-125	X	X	X
Índice de plasticidad	E-128	X	X	X
Equivalente de arena	E-133	X	X	X
Valor de azul de metileno (A)	E-235		X	X
Terrones de arcilla y partículas deleznable	E-211	X	X	
Impurezas en el agregado grueso	E-237			X
<b>Geometría</b>				
Índices de aplanamiento y alargamiento	E-230		X	
Partículas planas y aplanadas	E-240			X
Caras fracturadas mecánicamente	E-227		X	X
Angulosidad del agregado fino	E-239		X	X
Granulometría	E-213/E-214	X	X	X
<b>Características del llenante mineral</b>				
Densidad <i>bulk</i>	E-225			X
Vacios del llenante seco compactado	E-229			X
Concentración crítica	E-745			X
<b>Resistencia</b>				
CBR	E-148	X	X	
<b>Adhesividad</b>				
Riedel-Weber	E-774			X
Efecto del agua sobre la mezcla asfáltica suelta	E-757			X
Efecto del agua sobre la mezcla asfáltica compactada mediante tracción indirecta	E-725			X
<b>Gravedades específicas y absorción</b>				
Gravedad específica y absorción del agregado grueso	E-223			X (B)
Gravedad específica y absorción del agregado fino	E-222			X (B)
Gravedad específica del llenante mineral	E-128			X (B)

(A) El ensayo de azul de metileno se utiliza como complemento del equivalente de arena cuando el resultado de éste no satisface el requisito de la especificación.

(B) Los ensayos de gravedad específica y absorción de los agregados grueso y fino y de gravedad específica del llenante mineral no están especificados taxativamente, pero su ejecución es necesaria para los cálculos volumétricos de las mezclas asfálticas.

- Aunque los pavimentos asfálticos se pueden construir con muchos tipos de capas y así lo contemplan las especificaciones del Instituto Nacional de Vías, en aras de la síntesis en el artículo sólo se habla de los pavimentos convencionales de tipo flexible, constituidos por subbase y base granular y una o más capas de concreto asfáltico.

que se generan son activos. En este efecto inciden no solamente la petrología del agregado sino también la forma de las partículas, ya que las planas y alargadas son más fáciles de fragmentar que las equidimensionales, y una partícula redondeada sufre menos atrición que una angulosa.

### Resistencia a la fragmentación

Hay muchos ensayos que intentan simular esta situación. El más empleado en Colombia y en muchos otros países es el de degradación por abrasión, impacto y molienda en la máquina de Los Ángeles. Los resultados de las investigaciones relacionadas con la significación del ensayo de Los Ángeles son muy variados. Muchas han concluido que tiene una buena relación recíproca con los ensayos de impacto, pero que no es un indicador de la resistencia a la abrasión ni se correlaciona bien con el comportamiento en el campo. Las esferas de acero crean un impacto vigoroso sobre la muestra de ensayo, el cual eclipsa cualquier abrasión interparticular, que es el proceso predominante en los pavimentos sometidos al tránsito. Por otra parte, algunas de las rocas más blandas tienden a absorber la energía del impacto de las esferas, lo que se traduce en bajos valores de desgaste, incluso dentro de los límites de tolerancia.

El ensayo de Los Ángeles mide la degradación de un agregado pétreo con una composición granulométrica definida, como resultado de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero rotatorio que contiene un número determinado de esferas metálicas, que depende de la granulometría de la muestra de ensayo. A medida que gira el tambor, una pestaña de acero recoge la muestra y las esferas y las arrastra hasta que caen por gravedad en el extremo opuesto del tambor, creando un efecto de impacto y trituración. Entonces la muestra y las esferas ruedan dentro del tambor, hasta que la pestaña las levanta y se repite el ciclo. Tras el número especificado de revoluciones, se retira el contenido del tambor y se tamiza la porción de agregado para medir la degradación, como un porcentaje de pérdida de tamaño de las partículas.

Dentro de este grupo de pruebas de degradación mecánica se puede incluir también el ensayo del 10 % de finos, ideado en la Gran Bretaña para obtener una medida relativa de la resistencia de los agregados al aplastamiento. El 10 % de finos es la carga requerida para producir 10 % de partículas pasantes del tamiz de 2,36 mm (N.º 8) al someter una muestra de gravilla a una carga de compresión aplicada gradualmente.

La prueba del 10 % de finos consiste en compactar en un cilindro metálico una muestra de agregado de tamaño especificado, aplicándole golpes con una varilla. La muestra compactada se somete gradualmente a un esfuerzo de compresión, a causa del cual sus partículas se van fragmentando en una cuantía que depende de su resistencia al aplastamiento. El grado de fragmentación del agregado se evalúa mediante el tamizado del espécimen a través de un tamiz de 2,36 mm (N.º 8), luego de terminada la compresión. El procedimiento se realiza con varias cargas de compresión, con el fin de establecer la carga con la cual se produce en el agregado 10 % de partículas, en masa, que atraviesan las aberturas de este tamiz.

Algunos investigadores han hecho intentos para correlacionar los valores obtenidos al realizar estos dos ensayos. En la figura 1 a) se presentan los datos obtenidos por Minty et al. en 1980 y por Kissakwa en 1990, los cuales muestran una tendencia hacia una correlación no lineal. Cuatro análisis de regresión efectuados con esos datos dieron como resultado las relaciones promedio que se muestran en la figura 1 b), de acuerdo con las cuales una carga de 100 kN en el ensayo de 10 % representa, aproximadamente, un desgaste Los Ángeles de 30 % y una de 200 kN queda representada por un desgaste de 20 % (ref. 2). Como la dispersión de los datos es muy amplia, estos valores se deben tomar sólo como orientativos.

En investigaciones realizadas por el Ministerio de Transporte de Ontario (Canadá) se llegó a la conclusión de que el ensayo de abrasión micro-Deval era un buen indicador del comportamiento de los agregados en servicio y que los límites establecidos para sus resultados resultaban mucho más efectivos que los basados en la prueba de Los Ángeles (figura 2); además, se consideró



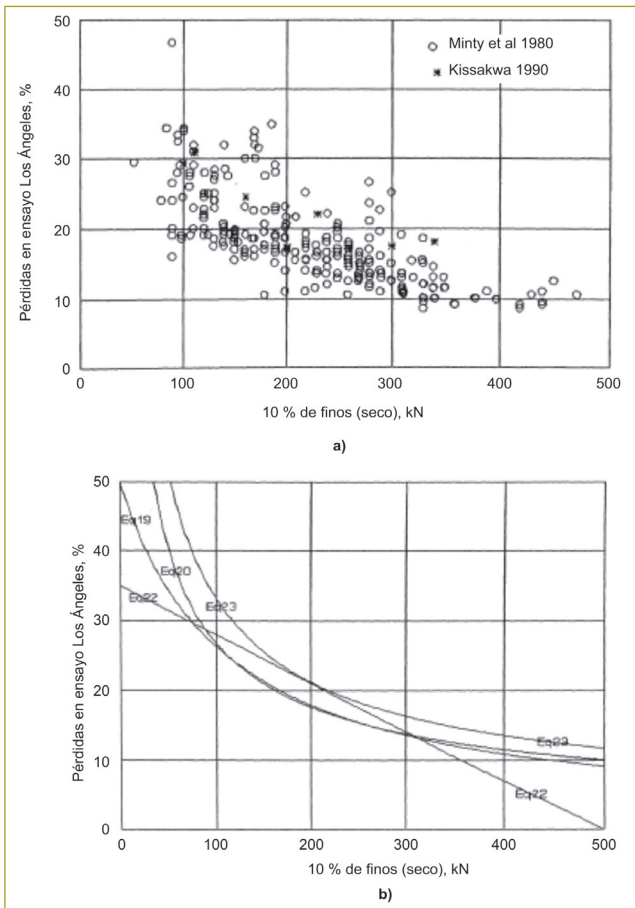


Figura 1. Relaciones entre los resultados de los ensayos de 10 % de finos y Los Ángeles (ref. 2).

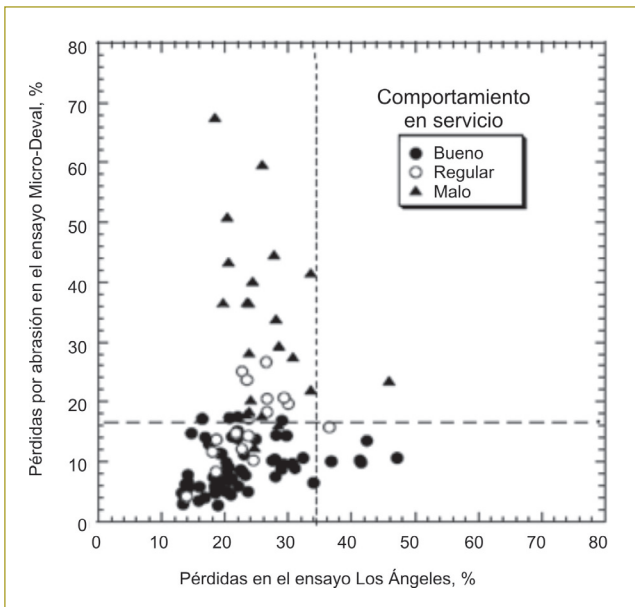


Figura 2. Relaciones entre los resultados de los ensayos de Los Ángeles y micro-Deval sobre cerca de cien muestras de agregados para capas asfálticas de rodadura en Ontario (ref. 3).

que por ser un ensayo de abrasión por vía húmeda ponía en clara evidencia aquellos tipos de rocas débiles que tienden a desintegrarse o a ver reducida su resistencia cuando se humedecen. La acogida que ha tenido este ensayo es tal que inclusive se han realizado estudios para establecer la posibilidad de que reemplace los ensayos tradicionales de solidez en sulfatos para medir la resistencia de los agregados al intemperismo.

El ensayo micro-Deval es una medida de la resistencia a la abrasión y de la durabilidad de los agregados pétreos, como resultado de una acción combinada de abrasión y molienda con esferas de acero en presencia de agua. Existen dos versiones: una para el agregado grueso y otra para el agregado fino. El artículo 450 de las especificaciones del Inviás solamente considera la primera. En este caso, una muestra del agregado grueso, con granulometría normalizada, se sumerge inicialmente en agua durante un lapso no menor de una hora. La muestra se coloca en seguida en un recipiente de acero de 20 cm de diámetro, con 2,0 litros de agua y una carga abrasiva, consistente en 5000 g de esferas de acero de 9,5 mm de diámetro. Recipiente, agregado, agua y carga se rotan a 100 r.p.m. hasta por 2 horas, dependiendo del tamaño de las partículas. Posteriormente, se lava la muestra y se seca en el horno. La pérdida es la cantidad de material que pasa el tamiz de 1,18 mm (N.º 16), expresada como porcentaje de la masa seca original de la muestra.

### Resistencia al pulimento

El pulimento es la pérdida de microtextura de la superficie de los agregados que se encuentra expuesta a los neumáticos de los vehículos. La principal causa del pulimento es el tránsito. Si el agregado se pulimenta demasiado, la superficie del pavimento se vuelve resbalosa, en especial cuando se encuentra húmeda, y el número de accidentes por deslizamiento se puede incrementar. En consecuencia, la resistencia de las partículas del agregado al pulimento es una característica esencial para la seguridad de los usuarios. Por su concepto, se exige solamente a los agregados que vayan a formar parte de la capa de rodadura.

El desarrollo y la retención de la microtextura se caracterizan mediante el coeficiente de pulimento ace-

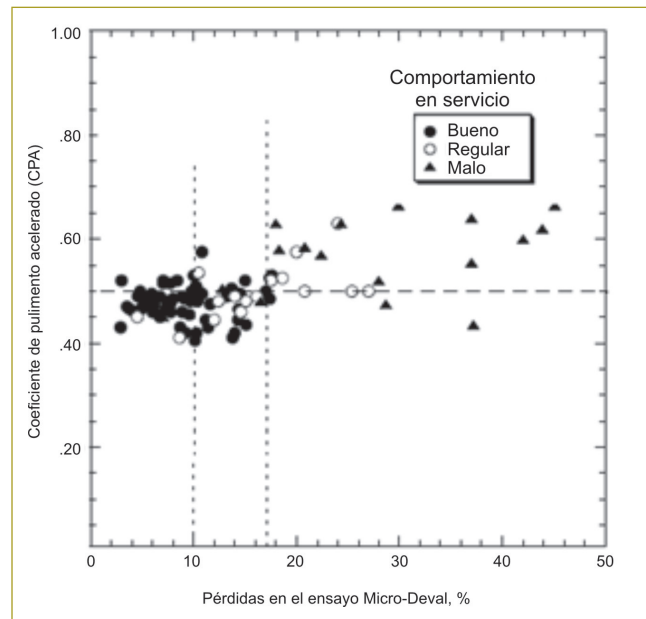
lerado (CPA). La resistencia al pulimento depende fundamentalmente de la naturaleza petrológica de la roca de origen. De acuerdo con estudios realizados en la Gran Bretaña (ref. 4), los agregados gruesos provenientes de areniscas y de algunas rocas ígneas, como el basalto y el granito, presentan una alta resistencia al pulimento, en tanto que los de tipo calizo tienden a pulimentarse mucho bajo la acción del tránsito automotor.

El ensayo de pulimento acelerado consiste en montar catorce probetas compuestas por partículas de gravilla sobre la periferia lisa de una rueda de 40 cm de diámetro, empleando un mortero de resina, y sometiénolas a la acción de una rueda neumática de 20 cm y de un material abrasivo. El ensayo tarda seis horas; durante las tres primeras, el material abrasivo que se aplica a la rueda es un esmeril granulado con tamaños entre 600 y 300  $\mu\text{m}$ , mientras que en las tres horas siguientes se utiliza polvo de esmeril muy fino. La velocidad periférica del neumático es de aproximadamente 24,5 km/h. El estado de pulimento alcanzado por cada probeta después de tratada en la máquina se mide por el coeficiente de fricción entre su superficie y una zapata de caucho de un aparato portátil de tipo péndulo, para determinar el coeficiente de pulimento acelerado (CPA). Se considera que el estado de pulimento de las probetas al cabo de seis horas se aproxima al estado final de pulimento que alcanza el agregado luego de varios meses en una carretera sometida a tránsito muy intenso o de varios años en una carretera de tránsito liviano.

Una alta resistencia al pulimento es siempre deseable, con tal de que el agregado también sea durable. Un error frecuente entre los ingenieros consiste en pensar que debe existir una relación directa entre las resistencias del agregado al desgaste y al pulimento. Si bien estos dos conceptos no son estrictamente separables, representan características diferentes de los agregados, ya que mientras el pulimento es una reducción de la microtextura del agregado, el desgaste lo es de la macrotextura (ref. 5). Por tal razón, y dependiendo de su petrografía, algunos agregados exhiben alta resistencia al pulimento cuando su resistencia a la abrasión es alta, mientras otros presentan alta resistencia al pulimento para una baja resistencia a la abrasión (ref. 6). En investigaciones hechas en la

Gran Bretaña llegaron a la conclusión de que, como regla general, los agregados constituidos por granos de minerales de diferente tamaño o dureza, o de granos duros en una matriz cementante más blanda, presentan mayores valores de CPA que aquellos compuestos por granos uniformes de dureza semejante dentro de una matriz de dureza similar.

Los resultados del comportamiento en servicio de cerca de un centenar de mezclas asfálticas elaboradas con agregados evaluados mediante los ensayos de pulimento acelerado y micro-Deval (figura 3) indican la necesidad de balancear apropiadamente las resistencias al desgaste y al pulimento (ref. 3).



**Figura 3.** Relaciones entre los resultados de los ensayos micro-Deval y de pulimento acelerado sobre cerca de cien muestras de agregados para capas asfálticas de rodadura en Ontario (ref. 3).

## RESISTENCIA AL INTEMPERISMO

Además de presentar tenacidad y resistencia a la abrasión, los agregados deben ser resistentes a la rotura o a la desintegración cuando se ven sometidos a ciclos de humedecimiento y secado (también a congelamiento y deshielo en países donde hay estaciones).

### Alterabilidad de los agregados

Aunque los agregados provenientes de algunos tipos de rocas presentan mayor sensibilidad que otros a los

cambios físico-químicos producidos por los agentes ambientales, y un estudio petrográfico puede brindar un indicio del grado de alteración de los componentes de una roca, ni este grado es cuantificable ni tampoco es posible pronosticar la evolución de la alteración con el simple examen petrográfico. Por ello, lo usual en la ingeniería vial es tratar de evaluar la alterabilidad de los agregados a través de ensayos como los de solidez frente a la acción de sulfatos y de desleimiento-durabilidad. Este último, aunque está normalizado por el Invías (norma INV E-236), se aplica únicamente para calificar algunas rocas débiles (como las lutitas), por lo que su uso no está considerado para valorar los agregados empleados en la construcción de las capas de los pavimentos de la red vial nacional.

Mediante el ensayo de solidez se intenta determinar la resistencia de los agregados pétreos ante la acción de la intemperie. Este efecto se simula en el laboratorio sometiéndolos a inmersión repetida en soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio, seguida de secado en el horno para deshidratar parcial o completamente la sal precipitada en los poros permeables de las partículas del agregado. Se supone que la fuerza de expansión interna, derivada de la rehidratación de la sal en la reinmersión, simula la expansión que sufre el agua al congelarse.

El ensayo de solidez consiste en someter una muestra del agregado, separada en varios rangos de tamaños, a cinco ciclos, consistente cada uno en inmersión en una solución saturada de sulfato de sodio o de magnesio durante 16 a 18 horas, seguida por el secado en horno a 110 °C hasta alcanzar masa constante. Este proceso hace que se formen cristales de sal en los poros permeables al agua del agregado, los cuales crean presión interna que fractura las partículas. Tras el quinto ciclo, las fracciones de la muestra se lavan, se secan en el horno y se tamizan para determinar las pérdidas individuales de masa debido a rotura o desintegración, pérdidas que se ponderan para obtener el resultado del ensayo.

El ensayo de solidez ha sido muy criticado no solamente por el tiempo que toma su ejecución y por su escasa precisión y repetibilidad sino, sobre todo, por

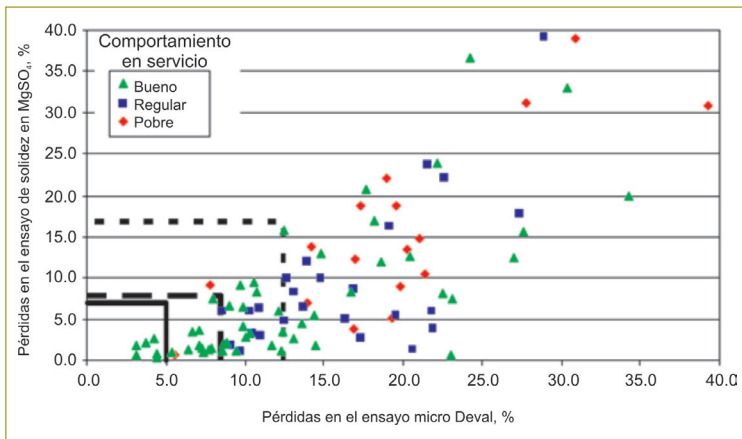
el cuestionamiento de su capacidad para predecir el comportamiento en servicio. Por otra parte, algunos agregados que contienen carbonatos de calcio o de magnesio son atacados químicamente por la solución de sulfato, obteniéndose valores de pérdida erróneamente altos. Asimismo, como el efecto físico que reproduce el ensayo es el de la acción del agua congelada dentro de los poros del agregado, muchos geólogos e ingenieros relacionados con la construcción vial en Colombia lo consideran excesivo, ya que los materiales de las carreteras nacionales no se encuentran sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo. A pesar de ello, el ensayo se ha mantenido en las especificaciones de construcción, por cuanto no se ha dispuesto de uno más apropiado para evaluar el posible comportamiento de los agregados en las condiciones climatológicas de servicio.

En años recientes se han hecho análisis de regresión entre los resultados de los ensayos de solidez en sulfatos y micro-Deval. Aunque se ha encontrado que hay relación directa entre ellos, en especial cuando las pérdidas en ambos son bajas, el ajuste entre los resultados no es suficientemente fuerte cuando son altas (partículas más blandas y absorbentes), condición crítica en relación con la selección de los agregados (figura 4). El hecho de que la correlación no sea mayor se debe, principalmente, a las diferencias en los mecanismos de degradación empleados en los dos ensayos. Independientemente de ello, lo que sí se ha determinado con claridad es que los resultados del micro-Deval son más consistentes y repetibles que los de la prueba de solidez.

Se puede concluir, en síntesis, que disponer de un ensayo realmente apropiado y ampliamente aceptado para valorar la resistencia al intemperismo de los agregados empleados en la construcción de pavimentos sigue siendo un asunto pendiente.

## LIMPIEZA

Un aspecto fundamental para garantizar el buen comportamiento de los agregados utilizados en las capas de los pavimentos es su limpieza. Los agregados deberán estar exentos de materia orgánica, finos arcillosos y otras partículas deletéreas. Con la caracterización de la limpieza lo que se pretende es que, en presencia de agua, todas las capas del pavimento conserven sus propiedades resistentes y, en el caso de las mezclas asfálticas, no haya problemas de adhesividad.



**Figura 4.** Comparación entre las pérdidas en el ensayo micro-Deval y en el de solidez sobre agregados empleados en la elaboración de mezclas de concreto asfáltico (ref. 7).

Las causas más frecuentes de la falta de limpieza de un agregado pétreo son el polvo adherido a las partículas durante su manufactura y su contaminación debido a una explotación incorrecta de las fuentes de materiales o por los suelos sobre los que se apoyan los materiales procesados durante su acopio, manejo y puesta en obra.

### Presencia de finos perjudiciales. Plasticidad

Las pruebas más elementales que contemplan las especificaciones del Invías para establecer la limpieza de los agregados son las que conducen a la determinación del índice plástico. Aunque no hay una correlación reportada entre la plasticidad de la fracción fina de los materiales de las capas de un pavimento y el desempeño de éste, está comprobado que ella afecta negativamente el comportamiento de las capas granulares, pues una cantidad excesiva de finos plásticos les puede hacer perder resistencia al humedecerse, promoviendo el ahuellamiento u otro tipo de deformación permanente; sin embargo, su efecto puede resultar poco significativo cuando la cantidad de finos es muy baja. Es evidente, en consecuencia, que los factores granulometría y plasticidad se deben considerar en conjunto. Teniendo en cuenta las franjas granulométricas incluidas en las especificaciones de las capas de base y subbase granular, se estima que si la plasticidad se mantiene por debajo del límite establecido en ellas, su efecto nocivo queda controlado.

En el caso de los agregados para las mezclas asfálticas densas, es deseable la presencia de partículas finas

(denominadas llenante mineral) para formar un mástico de alta resistencia cohesiva con el ligante asfáltico, que haga menos sensible la mezcla asfáltica a la acción del agua. En este caso, la ausencia absoluta de plasticidad en la fracción fina es crucial para evitar problemas de adhesividad.

El índice plástico de un suelo o de la fracción fina de un agregado es la diferencia entre sus límites líquido y plástico y corresponde al rango de humedad dentro del cual el material manifiesta un comportamiento plástico.

El límite líquido se determina mediante tanteos, en los cuales una porción de la muestra pasante por el tamiz de  $0,425 \mu\text{m}$  (N.º 40) se esparce sobre una cazuela de bronce y se divide en dos partes con un ranurador, permitiendo que esas dos partes fluyan como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la cazuela sobre una base normalizada. El ensayo requiere tres o más tanteos sobre un rango de contenidos de agua, cuyos resultados, al ser representados en un gráfico que ponga en conexión el número de golpes con la humedad, permiten establecer una relación a partir de la cual se determina el límite líquido, definido en el ensayo como el contenido de agua del suelo correspondiente al cierre de la ranura en una longitud aproximada de 13 mm tras 25 golpes recibidos por la cazuela.

El límite plástico se determina presionando de manera repetida una pequeña porción de suelo húmedo, de modo que se puedan formar rollos de 3,2 mm (1/8") de diámetro, hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el que se produce el agrietamiento y/o el desmoronamiento de los rollos. El límite plástico es la humedad más baja con la cual se pueden formar rollos de suelo de este diámetro, sin que se agrieten o desmoronen.

### Presencia de finos perjudiciales. Equivalente de arena y azul de metileno

El equivalente de arena es un ensayo muy práctico por su facilidad de ejecución y porque proporciona una información interesante en relación con la limpieza de las partículas menores de 4,75 mm. Sin embargo, es un ensayo incompleto, pues su resultado depende tanto de la cantidad como de la nocividad de los finos. Es posible



obtener el mismo equivalente de arena para finos más o menos plásticos, solamente variando su contenido (figura 5). Por esta razón, el ensayo se complementa, mas no se sustituye, con el de azul de metileno, el cual evalúa la actividad de la arcilla nociva presente en el agregado.

En el ensayo de equivalente de arena, un volumen normalizado de suelo o de agregado fino y una pequeña cantidad de solución floculante se colocan en un cilindro de plástico graduado y se agitan, para que las partículas de arena pierdan la cobertura de material arcilloso o similar. La muestra es posteriormente “irrigada”, usando cierta cantidad de solución floculante, para forzar al material arcilloso o similar a quedar en suspensión sobre la arena. Después de un período de sedimentación, se determinan las alturas de la arcilla floculada y de la arena en el cilindro. El equivalente de arena es la relación entre la altura de arena y la altura que alcanza la arcilla, expresada en porcentaje.

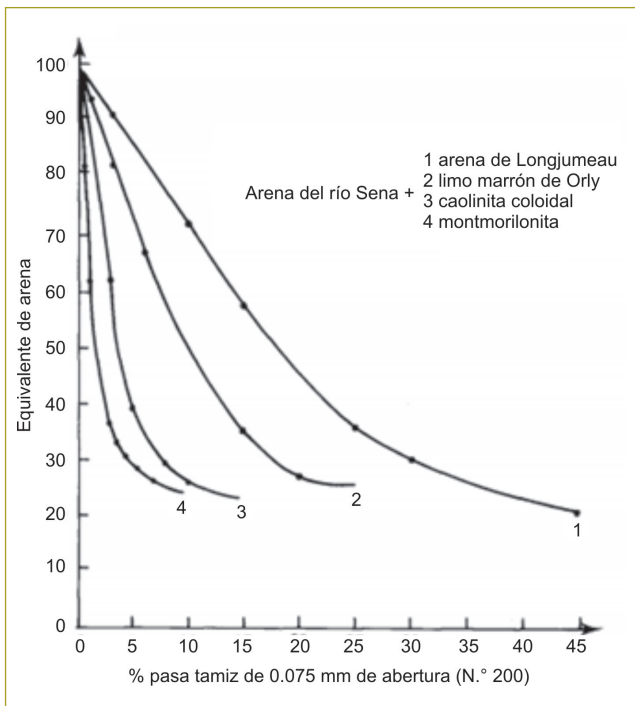


Figura 5. Variación del equivalente de arena en función del tipo y porcentaje de finos (ref. 8).

El ensayo del valor de azul de metileno consiste en añadir de manera sucesiva pequeñas dosis de una solución de azul de metileno a una suspensión de la muestra de ensayo en agua. Después de cada dosis se comprueba la absorción de solución colorante por parte de la muestra, realizando una prueba de coloración sobre papel de filtro para detectar la presencia de colorante libre. Una vez confirmada la presencia de colorante libre, se calcula el valor de azul de metileno, expresado en gramos de colorante absorbido por kilogramo de la fracción granulométrica ensayada.

### Presencia de partículas deletéreas

La determinación de la cantidad de terrones de arcilla y partículas deleznable es otra manera de verificar la limpieza de los agregados. Las partículas deleznable comprenden contaminantes como esquistos, madera, mica, carbón y otros materiales friables, cuya presencia en exceso afecta adversamente la capacidad de respuesta y la permeabilidad de las capas granulares, así como la adherencia con el asfalto en las capas ligadas, lo que genera desprendimientos.

El ensayo para determinar la cantidad de terrones de arcilla y partículas deleznable en un agregado consiste en tomar una muestra representativa de éste, secarla, pesarla y luego cubrirla con agua durante 24 horas, después de las cuales las partículas se ruedan y aprietan individualmente entre el pulgar y el índice para tratar de romperlas en tamaños más pequeños. Todas las partículas que se puedan romper con los dedos, convirtiéndolas en finos removibles mediante tamizado en húmedo, se clasificarán como terrones de arcilla o partículas deleznable. Posteriormente, la muestra se tamiza en húmedo, se remueven con cuidado de los tamices las partículas retenidas, se secan hasta masa constante a una temperatura de  $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , se dejan enfriar y se determina su masa. La diferencia entre las masas inicial y final, dividida por la inicial, es el resultado del ensayo.

### Limpieza del agregado grueso

La falta de limpieza es uno de los problemas más comunes de los agregados pétreos en Colombia. Un agregado

limpio y seco se deja mojar fácilmente por los ligantes hidrocarbonados. En ese orden de ideas, el Instituto Nacional de Vías decidió complementar los ensayos corrientes con otro de inspiración francesa, aplicándolo a la verificación de la limpieza de los agregados destinados a la elaboración de mezclas asfálticas. A la fecha no se conocen, sin embargo, referencias nacionales ni extranjeras sobre la real efectividad práctica de la ejecución de este ensayo.

El ensayo para la determinación de la limpieza superficial de las partículas de agregado grueso consiste en separar por lavado, mediante un tamiz de referencia, las partículas menores de 0.5 mm mezcladas o adheridas a la superficie de las partículas del agregado grueso, las cuales se consideran como impurezas. Posteriormente, se calcula el porcentaje en masa de las impurezas respecto de la masa seca de la muestra total, el cual se denomina “coeficiente de limpieza superficial”.

## GEOMETRÍA

Junto con la forma, la dureza y la limpieza, la granulometría tiene gran influencia sobre el comportamiento mecánico y las propiedades de resistencia de las partículas en contacto y, consecuentemente, de la capa de la que forman parte. El tamaño máximo del agregado, la distribución de los tamaños y la forma de las partículas determinan la manera como ellas se puedan empaquetar, suponiendo que son sometidas a una compactación apropiada.

### Forma

En relación con la forma, se prefieren las partículas equidimensionales a las aplanadas o alargadas, ya que estas últimas corren el riesgo de partirse debido a las tensiones provocadas durante su manejo y compactación o bajo la acción posterior del tránsito, modificando con ello la granulometría de las capas y, consecuentemente, su capacidad de respuesta y su permeabilidad. Aun si no se parten, las partículas aplanadas y alargadas generan problemas de trabajabilidad, pues se tienden a inmovilizar con las adyacentes, resistiéndose a la reorientación necesaria para conformar una estructura

más densa. Por lo tanto, un exceso de partículas planas y alargadas implica aumentar la energía de compactación para alcanzar una determinada densidad.

En las mezclas asfálticas, la modificación de la granulometría ocasionada por la fractura de estas partículas produce otras de menor tamaño que ocupan los vacíos en los agregados minerales, reduciendo el espacio disponible para que el asfalto cubra adecuadamente todo el agregado y dejando muchas partículas expuestas, lo que se puede traducir en la inestabilidad de la mezcla. De hecho, se ha establecido que el aumento de partículas aplanadas disminuye el módulo de las mezclas, haciéndolas más propensas al ahuellamiento (tabla 2).

**Tabla 2**

Variación del módulo resiliente con la proporción de partículas aplanadas en una mezcla densa en caliente (ref. 9)

Partículas aplanadas (%)	Módulo resiliente (MPa)	
	25 °C	40 °C
10	2444	324
20	2353	305
30	2278	298

En Colombia, la forma de las partículas de los agregados pétreos se ha evaluado a través de sus índices de aplanamiento y alargamiento desde 1970, con motivo de una asistencia técnica prestada por el Road Research Laboratory al Ministerio de Obras Públicas. Hace pocos años, el Invías decidió adoptar también un ensayo que forma parte del diseño de mezclas asfálticas del sistema Superpave, mediante el cual se determinan los porcentajes de partículas planas, alargadas y planas y alargadas. Este último ensayo es exigido por el Invías únicamente a los agregados destinados a la elaboración de mezclas asfálticas.

El ensayo de índice de aplanamiento consiste en dos operaciones sucesivas. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones, comprendida cada fracción entre los tamices de aberturas  $D_i$  (mayor) y  $d_i$  (menor). A continuación, cada una de las fracciones se criba empleando tamices de barras paralelas colocadas a separaciones  $0,6 \times [(d_i + D_i)/2]$ . Las partículas

que pasen el tamiz son consideradas planas. En lugar de los tamices de barras paralelas, se puede utilizar un calibrador con ranuras cuyas aberturas son del mismo tamaño de las separaciones de las barras de los tamices.

El ensayo de índice de alargamiento consiste, también, en dos operaciones sucesivas. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones. Luego, cada fracción se analiza utilizando un calibrador de longitudes, el cual tiene barras verticales separadas a distancias  $1,8 \times [(d_i + D_i)/2]$ . Se considera que todas las partículas retenidas por las barras son alargadas.

En el ensayo para la determinación de los porcentajes de partículas planas, alargadas o planas y alargadas en un agregado grueso, se miden partículas individuales de agregado de una fracción de tamaño específico, y se determinan las relaciones ancho/espesor, largo/ancho o largo/espesor, a partir de las cuales se calculan porcentajes por número o por masa o ambos, para cada grupo: 1) partículas planas; 2) partículas alargadas, y 3) total de partículas que son simultáneamente planas y alargadas, así como el porcentaje de partículas que no son ni planas ni alargadas.

El procedimiento de ensayo en el caso del agregado grueso consiste, en esencia, en separar manualmente las partículas que presenten caras fracturadas en cada una de las fracciones representativas del agregado y obtener su respectivo porcentaje, a partir del cual se calcula el porcentaje ponderado de la muestra total. Se debe usar la masa para calcular el porcentaje de partículas fracturadas, a menos que se especifique calcularlo con base en el conteo de partículas.

En el ensayo para determinar la angulosidad del agregado fino, un recipiente cilíndrico calibrado de 100 ml se llena con una muestra del material con la gradación prescrita, permitiendo que ésta fluya a través de un embudo desde una altura fija dentro del recipiente. El agregado fino se extrae del recipiente y se pesa para determinar su masa. Se calcula el contenido de vacíos de la muestra sin compactar como la diferencia entre el volumen del medidor cilíndrico y el volumen absoluto del agregado fino recogido en el medidor. El contenido de vacíos del agregado fino sin compactar se calcula usando su densidad relativa seca (gravedad específica). Se hacen dos medidas con cada muestra y los resultados se promedian.

### Angulosidad

La angulosidad mide las caras fracturadas y la rugosidad de los bordes de las partículas de un agregado. Es importante, por cuanto determina el nivel de resistencia interna al corte que se puede desarrollar en el medio interparticular. Las partículas redondeadas y no trituradas, como la grava de río, con una microtextura lisa, tienden a moverse bajo las cargas del tránsito, brindando una escasa resistencia al ahuellamiento. Los aumentos de caras fracturadas y de aspereza en la microtextura aumentan el módulo resiliente y disminuyen la relación de Poisson de los agregados, debido a que el mayor número de contactos entre partículas desarrolla más trabazón entre ellas y distribuye mejor los esfuerzos producidos por las cargas del tránsito.

El Instituto Nacional de Vías caracteriza la angulosidad de las partículas del agregado grueso a través del porcentaje de caras fracturadas, mientras que la de las partículas del agregado fino se controla determinando el contenido de vacíos de una muestra de él en estado suelto.

### Granulometría del agregado combinado

Uno de los ensayos básicos de laboratorio sobre los agregados en conjunto es el de granulometría, cuya finalidad es conocer la distribución de los tamaños de las partículas destinadas a la construcción de una determinada capa de pavimento. Las diferencias en las gradaciones se traducen en comportamientos significativamente distintos, aun en agregados del mismo tipo. Esto es el resultado del empaquetamiento diferente y de la distribución de vacíos, que desempeñan un papel fundamental en la distribución de los esfuerzos producidos por las cargas a través del contacto interparticular. La forma de curva granulométrica y el contenido de finos están interconectados en sus efectos sobre cuestiones tan importantes como la drenabilidad, la compactabilidad y las características resilientes y de resistencia a la deformación de las capas.

No viene al caso comentar las franjas granulométricas y su repercusión en las unidades de obra, pues se trata de un tema más propio de cada partida de trabajo que de las características exigibles a los agregados.

La práctica ha legitimado, para las unidades de obra, una serie de husos en los que debe encajar la granulometría o fórmula de trabajo respecto de la cual las especificaciones fijan las desviaciones admisibles durante la construcción de la capa. La mayor parte de las granulometrías especificadas para las mezclas asfálticas son sensiblemente continuas, a fin de lograr la máxima compacidad y estabilidad del conjunto, aunque también se emplean gradaciones uniformes (mezclas abiertas en caliente) y discontinuas (mezclas drenantes y mezclas discontinuas en caliente para rodadura).

La influencia de la granulometría en la formación de distintos tipos de estructuras granulares, con énfasis en las mezclas asfálticas, se trata de manera amplia en la referencia 10. Un procedimiento para desarrollar y ajustar combinaciones de agregados para mezclas asfálticas que garanticen la trabazón y el adecuado empaquetamiento de ellos, brindando una adecuada resistencia a la deformación permanente y manteniendo propiedades volumétricas que propician resistencia a los efectos ambientales, se describe en la referencia 11.

## CARACTERÍSTICAS DEL LLENANTE MINERAL

El material que pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N.º 200) del agregado empleado en la elaboración de las mezclas asfálticas requiere valoración mediante unas pruebas particulares. Ante todo, se especifica si el llenante puede ser el propio de los agregados o si debe provenir, parcial o totalmente, de aportación. Cualquiera sea el caso, se deberá tratar de un material no plástico.

### Finura

La finura del llenante mineral no debe ser excesiva, pues podría dar lugar a problemas de envuelta y al requerimiento de un cantidad exagerada de asfalto en la mezcla. Esta propiedad se caracteriza a través de su densidad *bulk*.

El ensayo de densidad *bulk* consiste en medir el volumen ocupado por una cantidad especificada del llenante mineral cuando se sedimenta en kerosene. La densidad se obtiene dividiendo la masa del material ensayado por el volumen que ocupó. A mayor volumen sedimentado menor es la densidad, lo que indica que el llenante es más fino.

## Concentración

La capacidad de las partículas del llenante para empaquetarse y retener el asfalto y contribuir en la formación de un mástico<sup>3</sup> de rigidez adecuada se puede estimar calculando su volumen de vacíos al ser compactado bajo condiciones normalizadas. De acuerdo con la literatura, entre mayores sean estos vacíos (llamados también vacíos Rigden), mayor es la contribución producida por el llenante a la resistencia viscosa del asfalto.

Sin embargo, el aumento progresivo de concentración de llenante en el mástico va produciendo una desviación cada vez más marcada del flujar viscoso del sistema y va desarrollando cierta rigidez (viscosidad estructural) que reduce la capacidad de deformación a carga y temperatura constante (ref. 12). Para conservar la capacidad de deformación viscosa del sistema llenante-asfalto, es necesario que la concentración volumétrica del llenante en el sistema no supere un valor “crítico” que establece la máxima relación llenante/asfalto que asegura la capacidad de deformación del mástico sin rotura por rigidez.

El ensayo destinado a determinar esa concentración crítica no es una prueba de calidad tendiente a la aceptación o al rechazo del llenante, sino a controlar cuantitativamente su incorporación en las mezclas para evitar problemas de rigidez. En tal sentido, se puede considerar como complementario del destinado a conocer los vacíos del llenante seco compactado. La concentración crítica corresponde a una dispersión de las partículas del llenante en el asfalto en el estado más suelto posible pero con contacto entre ellas, es decir, cuando el esfuerzo aplicado es consumido en la deformación viscosa del medio continuo (asfalto), y la resistencia friccional entre las partículas minerales tiende a un mínimo.

El volumen de vacíos del llenante mineral seco compactado se determina colocando y compactando una muestra del llenante seco en un molde bajo condiciones normalizadas y determinando el volumen ocupado por ella. Con la masa y el volumen, más la gravedad específica del llenante, se calculan

3. Se llama mástico al conjunto conformado por el ligante asfáltico y el llenante mineral en una mezcla asfáltica.



los vacíos con aire en la muestra compactada empleando relaciones geométricas.

El ensayo de concentración crítica se realiza añadiendo una masa conocida de llenante seco a 20 cm<sup>3</sup> de kerosene libre de agua, contenidos en una probeta. La probeta se sumerge en un baño de agua en ebullición, agitando el contenido con un alambre fino hasta eliminar totalmente el aire. Al cabo de una hora se retira la probeta del baño y se deja sedimentar en reposo completo durante 24 h. A continuación, se lee el volumen del sedimento. La concentración crítica se determina dividiendo la masa de llenante utilizada, por su gravedad específica y por el volumen del sedimento.

## RESISTENCIA

Las consideraciones más importantes en relación con la construcción de las capas granulares no ligadas de un pavimento se relacionan con la uniformidad de su colocación in-situ, el nivel de compactación y la modificación de su humedad desde la compactación hasta su cobertura. El nivel de compactación y la humedad condicionan la resistencia a la deformación permanente y el módulo de los materiales granulares durante el servicio del pavimento.

En el estado actual de la práctica, los métodos de diseño de pavimentos asfálticos exigen la caracterización de la subrasante y de los materiales granulares no ligados a través de su módulo resiliente (MR), el cual se determina mediante un ensayo triaxial cíclico, sometiendo un espécimen del suelo a una carga pulsante de duración definida.

El ensayo triaxial cíclico requiere un equipo y unas condiciones de trabajo muy especiales, motivo por el cual su ejecución resulta dispendiosa, demorada y costosa, de manera que, en la mayoría de los estudios rutinarios, no es posible o no resulta práctico realizarlo, siendo habitual valorar la capacidad de respuesta de los materiales mediante otros ensayos más expeditos, de los cuales el más empleado en Colombia y en buena parte del mundo es el CBR. Aun reconociendo que el CBR no mide una propiedad fundamental de los suelos ni de los agregados pétreos, hay acumulada tanta experiencia con su empleo, que infinidad de agencias viales nacionales (el Invías entre ellas) e internacionales lo siguen utilizando como prueba para valorar la respuesta de

los suelos para diseñar pavimentos de calles, carreteras y aeropistas, así como para determinar la idoneidad de los materiales granulares previstos para la construcción de capas granulares de subbase y de base.

El ensayo CBR mide el esfuerzo necesario para penetrar un pistón de dimensiones determinadas a una velocidad previamente fijada en una muestra compactada bajo determinadas condiciones de humedad y densidad y, generalmente, después de un lapso de inmersión en agua. La relación, en porcentaje, entre este esfuerzo y el requerido para penetrar la misma profundidad una muestra de referencia es la resistencia de la muestra ensayada, expresada en unidades de CBR.

## ADHESIVIDAD

Las dos principales causas por las cuales el agua afecta la integridad de la interfase asfalto-agregado en una mezcla son la pérdida de adhesión entre la película de ligante y las partículas del agregado y la pérdida de la resistencia cohesiva de la mezcla. La pérdida de adhesión es producida por el agua que se logra interponer entre la película de asfalto y el agregado provocando la desvuelta de éste y los consecuentes desprendimientos del asfalto que envuelve las partículas, mientras la pérdida de cohesión se debe al debilitamiento que produce la presión de poros generada por el agua en el sistema asfalto-llenante mineral de la mezcla. Que la falla sea adhesiva o cohesiva depende de la naturaleza del mortero asfáltico (sistema asfalto-llenante) y del espesor de la película asfáltica que rodea las partículas de los agregados. Se ha determinado que cuando la película es muy delgada, la mezcla se deteriora a causa de la rotura de la liga adhesiva entre la película y las partículas minerales, mientras que cuando es espesa, el daño por humedad se produce debido a una falla cohesiva.

Sería deseable que existiera un método seguro para determinar en el laboratorio si un ligante asfáltico se adherirá bien a un determinado tipo de agregado en presencia de agua. Hasta el presente, los estudios sobre las propiedades físico químicas del sistema agregado-asfalto-agua no han sido suficientemente concluyentes para conducir a un método confiable para uso rutinario.

Los ensayos desarrollados para evaluar la sensibilidad de las mezclas asfálticas a la humedad se pueden clasificar en dos grandes grupos: los que se realizan sobre mezclas en estado suelto y los que se conducen sobre mezclas compactadas. Los del primer grupo solamente ofrecen una estimación de la compatibilidad entre el asfalto y el agregado y del potencial de pérdida de envuelta en presencia de agua, mientras los del segundo grupo intentan considerar, mediante pruebas mecánicas, la acción del agua (y en algunos casos también el efecto del tránsito) sobre el comportamiento de las mezclas compactadas. Las especificaciones de construcción del Instituto Nacional de Vías incluyen tres ensayos para determinar las condiciones de adhesividad en presencia de agua: dos del primer grupo (uno para el agregado fino y uno para el grueso) y uno del segundo grupo.

#### Adhesividad del agregado fino con el asfalto

Las especificaciones exigen valorar la adhesividad de los ligantes asfálticos con las arenas naturales o provenientes de trituración, sometiendo una mezcla de ellos a la acción de soluciones de carbonato sódico de concentración molar creciente, prueba conocida como Riedel-Weber. Aunque las condiciones de este ensayo no representan en absoluto la realidad de la obra, se lo considera eficaz por su rigor, de forma que una buena adhesividad dada por él se traduce, normalmente, en un margen de seguridad suficiente para el uso del agregado fino. El ensayo es muy utilizado, por cuanto brinda una respuesta expresada numéricamente y, además, es de muy sencilla ejecución.

En el ensayo Riedel-Weber una muestra del agregado se reduce al tamaño 0,2/0,6 mm y se envuelve con el ligante en una proporción determinada. Se toman 0,5 g del aglomerado y se hierven en 6 ml de agua durante un minuto. Si el ligante se separa del agregado, se considera que la adherencia entre ellos es pobre. Si esto no ocurre, se repite el ensayo sustituyendo el agua por 6 ml de solución de carbonato de sodio en concentraciones crecientes, utilizando cada vez una nueva porción del aglomerado. La adhesión se califica con un número asignado a la menor concentración de carbonato de sodio que produce el desplazamiento total del ligante de la superficie de la arena.

#### Adhesividad del agregado grueso con el asfalto

Las especificaciones de construcción del Inviás exigen valorar la adhesividad del agregado grueso con el asfalto mediante un ensayo rápido que permite determinar visualmente la pérdida de adherencia en mezclas sueltas de agregados cubiertos con asfalto, al ser sometidas a la acción de agua hirviendo. La ASTM considera que este método de ensayo es útil como indicio de la vulnerabilidad relativa del agregado cubierto de asfalto a la acción del agua, aunque recomienda no emplearlo como un indicador de su comportamiento en el campo, porque aún no se han establecido correlaciones para tal fin. Sugiere, además, que si el resultado muestra una pérdida importante de adherencia debido a la acción del agua, se empleen otros métodos de ensayo más detallados, para evaluar mejor la mezcla en relación con las características de adherencia del par ligante-agregado.

En todo caso, la prueba es muy incierta, tanto por lo subjetivo de su resultado como por el hecho de que si se observan desprendimientos, no se puede saber si se deben a la acción del agua o a la poca afinidad existente entre el agregado y el ligante.

El ensayo consiste en colocar durante diez minutos una muestra de mezcla asfáltica suelta en un recipiente con agua destilada hirviendo. Tras permitir el enfriamiento de la mezcla hasta alcanzar la temperatura ambiente, se decanta el agua y se vacía la mezcla húmeda sobre una toalla de papel blanco. Enseguida se determina visualmente la retención de la cobertura asfáltica por parte del agregado. Cualquier área con cubrimiento tenue, ennegrecida o translúcida será considerada como plenamente cubierta.

#### Resistencia de la mezcla compactada a la acción del agua

Los ensayos realizados sobre probetas se ajustan mejor a las condiciones de obra, ya que cuantifican la adhesividad midiendo la pérdida de cohesión de una mezcla compactada en una prueba de tracción indirecta, como resultado de los efectos de saturación acelerada en agua. Estos ensayos miden el comportamiento de la mezcla en conjunto (agregado grueso, agregado fino, llenante mineral y ligante).

El método especificado por el Invías es el Tunncliff-Root. Este ensayo se emplea para probar mezclas de concreto asfáltico, en conjunto con los ensayos requeridos para el diseño de la mezcla, y su finalidad es establecer el potencial de daño por humedad, así como determinar si un aditivo mejorador de adherencia es efectivo o no y, en caso de que lo sea, encontrar la cantidad óptima de él para maximizar su efectividad. Este método de ensayo se puede usar, también, para evaluar mezclas producidas en planta, con el propósito de calificar la efectividad de los aditivos bajo las condiciones impuestas en servicio.

La sensibilidad al daño por humedad se determina preparando un grupo de especímenes compactados en el laboratorio, de acuerdo con la fórmula de trabajo de la mezcla y sin aditivos. Los especímenes se compactan de manera de obtener un contenido de vacíos con aire entre 6 y 8 %. El grupo se divide en dos subgrupos con contenidos de vacíos aproximadamente iguales; cada espécimen debe tener su par en el otro grupo. Un subgrupo se mantiene en condición seca, mientras que el otro se satura parcialmente con agua y se acondiciona en un baño de agua. La resistencia a la tensión de cada uno de los subgrupos se determina por la prueba de tracción indirecta. El potencial de daño por humedad queda indicado por la relación entre las resistencias a la tensión del subgrupo húmedo y las del subgrupo seco.

El efecto de un aditivo mejorador de la adhesividad se determina empleando un grupo de especímenes que contienen el aditivo y que se ensayan como se describe en el párrafo anterior. El efecto del aditivo se determina repitiendo las pruebas en grupos con diferentes dosis del producto.

### GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN

Las prácticas actuales del diseño y del control de la producción de las mezclas asfálticas se basan en las propiedades volumétricas. Los valores de las gravedades específicas de los agregados y del llenante mineral son indispensables para el cálculo de dichas propiedades en las mezclas compactadas. En esencia, las medidas de gravedad específica son factores que permiten convertir porcentajes en masa a proporciones en volumen.

Las gravedades específicas y la absorción (que se puede calcular a partir de las medidas realizadas en los ensayos normalizados para determinar las gravedades específicas) son propiedades intrínsecas de los agregados y, por lo tanto, no se especifican valores numéricos de ellas, aunque en el caso de la absorción algunas agencias viales (no en el país) la suelen limitar por cuanto una absorción elevada es sintomática de una alta porosidad que implica mayores requerimientos de ligante y, eventualmente, problemas de durabilidad, dado que su resistencia a la fragmentación es, por lo general, baja<sup>4</sup>.

Algunos investigadores han tratado de establecer relaciones entre la absorción y otros ensayos de calificación de los agregados. Uno de ellos intentó hallar una con los resultados de los ensayos de solidez en sulfato de sodio y aunque no la pudo obtener, encontró que el 82 % de los agregados con una absorción igual o superior a 2 % no satisfacían los requisitos exigidos a la prueba de solidez, mientras que la insatisfacción fue total cuando la absorción alcanzó 4 % (ref. 13). Estudios posteriores han confirmado que a medida que la absorción de los agregados aumenta, también lo hacen las pérdidas en la prueba en sulfatos, pero nunca se han llegado a obtener correlaciones realmente confiables.

También se han realizado investigaciones para establecer relaciones entre la absorción y la resistencia de los agregados a la fragmentación. Los coeficientes de correlación obtenidos han sido, por lo general, menores que los encontrados al compararla con las pérdidas en el ensayo de solidez (ref. 7).

### EPÍLOGO

Las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías incluyen ensayos debidamente normalizados que, dentro del estado actual de la práctica y salvo excepciones, resultan significativos, a la vez que sencillos, rápidos y de suficiente precisión, repetibilidad y reproducibilidad para caracterizar los

4. De la limitación en relación con el valor máximo de absorción se exceptúan algunos subproductos industriales empleados como agregados; la escoria de alto horno, por ejemplo, que pese a su alta capacidad absorbente presenta otras características que la hacen deseable, entre ellas su mayor resistencia al pulimento.

agregados pétreos. Sus características fundamentales que se pretenden evaluar con estos ensayos son la resistencia a la fragmentación, al pulimento y al intemperismo, la limpieza, la forma, la angulosidad, la granulometría, la resistencia y la adhesividad con ligantes asfálticos.

Los valores límites que fijan las especificaciones como aceptables a los resultados de los ensayos se basan en la relación entre ellos y el comportamiento en obra, de acuerdo con la experiencia local y foránea. En todos los casos, los criterios son más restrictivos a medida que los niveles de exposición y las condiciones de carga a que va a estar sometido el agregado son más intensas.

## REFERENCIAS

1. <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>.
2. Vanderstaay, A.G.B. (September, 1994). An investigation into the ten percent fines test and other tests used to determine the strength of road making aggregates. Thesis submitted to the Central Queensland University.
3. Rogers, C.A., Lane, B.C. & Senior, S.A. (April, 2003). The micro-Deval abrasion test for coarse and fine aggregate in asphalt pavement. Ministry of Transportation (MTO), Downsview, Ontario, Canada, 11th Annual Symposium on Aggregates – Asphalt Concrete, Bases and Fines 2003, Austin, Texas, USA, 27-30.
4. Road Research Laboratory (1965). Materiales bituminosos en construcción de carreteras. Traducción española de Manuel Velásquez Velásquez. Madrid: Ministerio de Obras Públicas.
5. Abdui-Malak, M.-A.U., Meyer, A.H. & Fowler, D.W. (August, 1992). Implication of aggregates in the construction and performance of seal coat pavement overlays. Report N.º FHWA/TX-96/490-2, Center for Transportation Research The University of Texas at Austin.
6. Xirouchakis, D.M. (November, 2013). Correlations between mechanical and geometrical parameters in aggregates: a tool for quality assessment and control. *European Geologist, Journal of the European Federation of Geologists*, N.º 36, pp. 15-18.
7. Fowler, D.W., Allen, J.J., Lange, A. & Range, P. (June, 2006). The prediction of coarse aggregate performance by micro-Deval and other aggregate tests. Report N.º ICAR 507-1F, International Center for Aggregates Research, The University of Texas at Austin.
7. Tran, N.L. (mai-juin, 1980). L'essai au bleu de méthylène. Un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des granulats. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, 107.
8. Mahmud, M.Z.H., Yaacob, H., Jaya, R.P. & Hassan, N.A. (2014). Laboratory investigation on the effects of flaky aggregates on dynamic creep and resilient modulus of asphalt mixtures. *Jurnal Teknologi*, Penerbit UTM Press, Malaysia.
10. Rivera de Ronchi, Y. Llano, O.F.M. & Ruiz, C.L. (noviembre de 1975). Sobre la estructura granular de las mezclas asfálticas convencionales. Decimonovena reunión del asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Paraná.
11. Vavrik, W.R., Pine, W.J., Huber, G. Carpenter, S.H. & Bailey, R. (2002). Bailey method for gradation selection in HMA mixture design. Draft TRB Circular.
12. Ruiz, C.L. (febrero de 1966). Concentración crítica de filler, su origen y significado en la dosificación de mezclas asfálticas. Publicación N.º 11, Dirección de Vialidad, Provincia de Buenos Aires, La Plata.
13. Woolf, D.O. (December, 1927). Relation between sodium sulfate soundness tests and absorption of sedimentary rock. Public Roads.



# Entrevista

## TARCISIO CELESTINO

“Si hay un temblor, donde quiero estar es en un túnel”

Por Cristina Salazar Perdomo



Ph.D. en Mecánica de Rocas de la Universidad de California en Berkeley (Estados Unidos). Actual vicepresidente de la International Tunnelling Association (ITA). Profesor universitario, investigador y consultor de varios proyectos, como los túneles del metro de Brasilia, túneles de ferrocarril y otros túneles en São Paulo. Como gerente de Ingeniería Civil en Themag Engenharia en São Paulo, ha sido responsable de numerosos proyectos de transporte e hidroeléctricos. Ha sido presidente de la Asociación Brasileña de Geología para Ingeniería y presidente para Suramérica de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (SIMR-ISRM). Es miembro del comité editorial de las revistas *Tunneling and Underground Space Technology* (Elsevier), Oxford; *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Springer-Verlag, Viena; y *Solos & Rochas*, ABMS, São Paulo.

El Centro de Estudios Geotécnicos del Programa de Ingeniería Civil llevó a cabo el Diplomado en Túneles en Suelo y Roca. Como parte de las actividades planeadas, invitó a los expertos internacionales Tarcisio Celestino, de Brasil, y Gianfranco Perri, de Venezuela, quienes compartieron con los participantes sus conocimientos y experiencias en la materia. La *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* habló con ellos sobre estas construcciones que constituyen opciones apropiadas en los tiempos modernos.

**Mucho se ha hablado de la necesidad de construir el metro de Bogotá y al parecer ha llegado el momento de llevar a la realidad los planes de varias décadas. ¿Qué piensa usted de la situación de Bogotá, a partir de su experiencia en reconocidas metrópolis?**

La cantidad de población crea la necesidad del metro. São Paulo es más grande que Bogotá: tiene doce millones de habitantes y cinco líneas de metro, una de las cuales opera parcialmente, o sea, que son como cuatro y media líneas de metro. Transporta tres millones y medio de pasajeros al día y no es suficiente. Veo paradas de autobuses con tanta gente que es la mejor expresión de la necesidad del transporte masivo, más allá de un autobús para recoger algunas personas. Aunque en Transmilenio se pueda comprar el tiquete con anticipación, el tiempo de espera es tan grande que hace falta un sistema con más capacidad. Es clarísima la necesidad de un metro para Bogotá, una ciudad muy agradable, que tiene muchos encantos; incluso diría que es mucho más

grata que São Paulo. No conozco una ciudad de ocho millones de habitantes que no tenga metro.

### **Entrando en materia, entre la opción del metro subterráneo y el superficial, ¿cuál considera mejor?**

No es cuestión de lo que yo considere. Voy a darle datos de la ciudad de Seúl, capital de Corea del Sur. Empezaron a hacer el metro en los años setenta, exactamente como São Paulo. Hay un dato muy interesante y es que en esa década el ingreso per cápita de los coreanos era el 30 % más bajo que el de nosotros en Brasil. Hoy, pasados 40 años, el ingreso per cápita es 80% más alto que en Brasil. ¿Por qué? Porque invirtieron correctamente en infraestructura y educación.

Pienso que en Brasil no lo hicimos bien. Los coreanos, en cambio, efectuaron un estudio muy juicioso para determinar el impacto del metro subterráneo en Seúl y encontraron que el impuesto de propiedad aumenta, por lo que la ciudad gana a largo plazo: desde el punto de vista económico, por el ingreso de impuestos en la ciudad, y en cuanto a las empresas, porque quieren estar en un lugar en el que sus trabajadores tengan facilidad de transporte.

Cuando se hace un metro en superficie, la ciudad pierde área, hay expropiaciones y éstos son impuestos que se dejan de captar para siempre, mientras que cuando es subterráneo, se atrae gente y los impuestos aumentan porque la calidad de las construcciones mejora. Si es en la superficie, sucede lo contrario.

Ahora en Río de Janeiro están haciendo dos túneles para sustituir una vía elevada para carros en un área muy bonita, que estaba degradada por la vía elevada; se están haciendo inversiones en la zona central de Río de Janeiro. Por ejemplo, hay un proyecto muy grande, bien pensado, llamado Puerto Maravilla, que incluye inversiones de desarrollo urbanístico. Parte del dinero para pagar la obra se obtendrá del mercado inmobiliario, porque en los lotes que hoy no valen nada se van a construir torres de hoteles, de oficinas, solamente porque ponen las cosas donde deben estar: debajo de la superficie.

**Hay quienes dicen que Bogotá no fue una ciudad bien planeada, que se ha expandido desordenadamente. ¿Qué cree que se debe hacer en esta oportunidad maravillosa en que tal vez se construya el metro para que dentro de 20 años no se “quede**

### **pequeño”? ¿Cómo hacer del metro una solución a largo plazo?**

Esta es una solución viable. No deben preocuparse porque Bogotá no haya sido bien planeada. Tampoco lo fueron São Paulo ni Río de Janeiro. Conozco una ciudad que sí fue planeada, Brasilia, y algunas otras pequeñas.

No creo que la planeación resista ocho millones de habitantes; de pronto uno o dos millones, que es lo que tiene Brasilia, aunque ya no resiste los 50 años que tiene. Éste es un problema universal.

En ciudades que no fueron bien planeadas, como Bogotá y São Paulo, la ventaja de contar con una red de transporte subterránea es que no tiene ninguna conexión con la malla vial que está arriba. Es diferente si planeamos un transmilenio o un metro elevado porque hay que utilizar las calles y la malla vial, pero una red subterránea puede hacerse en diagonal: las calles van norte-sur, este-oeste, y el metro puede ir al noreste, al suroeste, completamente desvinculado. Es una de las mayores ventajas que hay, pues se puede construir una línea que conecte la demanda a la oferta.

En São Paulo se hizo un estudio sobre dónde trabajan las personas, dónde viven, para saber la necesidad del transporte. Este es un mapa muy importante con respecto a la demanda del transporte en la ciudad.

Cuando uno hace el metro, basta ver los resultados de la investigación y construir una línea que vaya de donde las personas trabajan a donde viven. ¡Es tan sencillo! Y sin impactar la superficie. La Tierra tiene cada vez más gente y podemos multiplicar todo: la producción, la energía, pero hay una cosa que no podemos multiplicar y es el área del planeta. Debemos preservar la superficie para nosotros, para estar en los parques y disfrutar el sol.

### **En esa visión cosmopolita, uno se pregunta cómo conciliar el uso del vehículo particular, la bicicleta, el metro, el Transmilenio. ¿Cómo sería la ciudad ideal? ¿Es posible lograr una movilidad perfecta?**

La ciudad ideal no debería depender tanto del carro para la movilidad diaria. Infortunadamente, eso pasa en São Paulo y en Bogotá. Seúl, con diez millones de habitantes, cuenta con 400 kilómetros de metro. São Paulo, con 80. Ellos no están satisfechos porque una cosa que ocurre claramente con la oferta de transporte urbano es que cuanto más se ofrece, más lo usa la población. En Seúl hoy lo hacen con otro nivel de transporte, más

abajo del metro, como lo hizo París, que tiene una red maravillosa construida desde hace bastante tiempo, y ya hace mucho agregó la Réseau Express Régional (RER), un metro más profundo, que no para en todas las estaciones.

**Para la gente del común es difícil entender cómo es posible construir un nivel debajo del subterráneo. Técnicamente, qué implicaciones tuvo.**

La ingeniería está muy avanzada en cuanto a construcciones subterráneas, pero este desarrollo no es tan antiguo, yo diría que se hace desde la mitad del siglo XIX. Hay dos formas de poner el metro: en una se hace una excavación subterránea con un túnel y el que está en la superficie no sabe que se está construyendo; en la otra se hace una zanja, se construye la estructura y después se rellena.

En 1970, la mayor parte de la construcción subterránea se hizo de esta última manera en São Paulo. Yo era estudiante y viví esta situación. La construcción interfería terriblemente en la superficie. El impacto fue enorme desde los puntos de vista urbanístico, social y económico. Muchas de las personas que tenían su negocio quebraron porque una construcción como ésta tarda tres o cuatro años y nadie va a un negocio que tiene un gran hueco al frente.

Después de los años ochenta, en São Paulo se comenzaron a sustituir esas construcciones por túneles del metro convencional. La utilización de este método en cuanto a lo urbanístico y social fue muy importante, ya que después se empezaron a construir así no sólo los túneles de vía sino las estaciones, mientras en la superficie la vida continuaba normalmente.

Todo esto se puede tener en Bogotá, pese a que el suelo aquí no es de los mejores. Un buen suelo es como el que tenemos en São Paulo. Hace millones de años la ciudad fue un lago; éste acumuló muchos sedimentos y después hubo una erosión. Hoy, la ciudad está en lo que quedó abajo: una arcilla compactada por centenares de metros de sedimentos, con buenas propiedades mecánicas de resistencia y baja deformabilidad, que no es el caso de Bogotá. Aquí la resistencia es baja y la deformabilidad alta, pero no es impedimento.

Los túneles no solamente tienen el problema de la estabilidad para excavarlos sin riesgos, sino el de la deformación de los túneles a largo plazo, porque con un poco de agua los túneles drenan y se van deformando.

Este es un problema que tienen el metro de Shanghai y los de otras ciudades cercanas.

Aquí en Bogotá el problema no es tan serio, pero la ingeniería tiene soluciones; entonces, a mi juicio, sí se puede construir el metro.

**El lado positivo de la demora en construir el metro es que se pueden aprovechar las experiencias de otros y todo el avance tecnológico. Hoy, ¿con qué metodología y con qué tecnología particular se construiría el metro en Bogotá, de modo que el proceso sea más ágil, económico y seguro?**



Yo diría que lo más probable es que el metro en Bogotá se tenga que construir con máquinas *shield* o *tunnel boring machine* (TBM). Lo más apropiado sería un EPB, que es un tipo de TBM, porque es lo más indicado para suelos arcillosos; estas máquinas se caracterizan porque no necesitan que se rebaje el nivel freático, que es el gran problema de asentamiento en Bogotá; están hechas exactamente para trabajar en tales condiciones. Si pensamos cómo se construyeron el metro de Shanghai y los de las ciudades cercanas, donde los sedimentos son de calidad más baja, geotécnicamente hablando, la respuesta es con EPB.

**En la construcción de un túnel, ¿afecta en algo que la zona tenga mucho riesgo sísmico?**

No. Hay que tener cuidado, pero siempre digo “Si hay un temblor, donde quiero estar es en un túnel”.

Yo estudié en Berkeley (California), que es una zona sísmica, y después de que me gradué, en 1989 hubo un terremoto. Allí hay un metro, un túnel subacuático de San Francisco a Oakland, y al lado hay un puente, el Bay Bridge. En ese terremoto, conocido como el de Loma Prieta, un tramo completo del viaducto cayó y hubo 70 muertos.

En el metro, había un tren que iba de Oakland a San Francisco y fueron a la primera estación a averiguar qué había pasado, si se había afectado el túnel. Vieron acercarse el vagón y al abrirse las puertas le preguntaron a la gente cómo había sido. “¿Cómo fue qué?”, contestaron. “El terremoto”, les dijeron. “¿Qué terremoto?”, respondieron. Las personas no lo habían sentido. Pararon el tren para inspeccionarlo y notaron que no le había pasado nada.

En conclusión, claro que en ingeniería hay que tener en cuenta la sismicidad, pero es mucho más fácil considerar los sismos para un túnel que para un puente o para un edificio.

### **En la construcción de un túnel, ¿en qué medida se debe considerar lo que está en la superficie, como puentes y edificaciones?**

Esto es importantísimo. La diferencia entre hacer un túnel en la montaña y uno urbano es muy grande. Un túnel urbano es más costoso, desde el punto de vista de cuidados y de costos de instrumentación; hay que instrumentar los edificios y el túnel con mucha más intensidad para entender exactamente lo que pasa.

Existen métodos para prever los asentamientos, los desplazamientos. Algunos desplazamientos son inevitables, y lo que es ineludible hay que corregirlo. Existen técnicas. Por ejemplo, hacer inyecciones: se hace un túnel y en algunas situaciones es inevitable que la superficie sufra un asentamiento como éste (estoy

exagerando). Lo que se hace es poner una tubería que va a inyectar lechada de cemento. Se crean bolsones de lechada en profundidad, que con alta presión hacen que la superficie vuelva a su posición original. Entonces, primero hay que intentar disminuir un poco más y para esto están las máquinas EPB que se construyeron para esto, para provocar mucho o poco asentamiento (poco no significa cero). Después de que ocurre el asentamiento, se puede corregir de ese modo.

Hacer un túnel en las ciudades es más complicado, pero se cuenta con las técnicas, no hay ninguna dificultad. He conocido túneles que pasan por debajo de las cimentaciones de un edificio. Claro: bien instrumentado, con lecturas de instrumentación frecuentes, dos o tres veces al día.

### **¿Qué tan frecuente puede ser que en la construcción de un túnel encuentren algo que no estaba previsto en el diseño?**

Esto hay que considerarlo porque el principal material para la construcción del túnel no es lo que ponemos, es lo que está allá, es el macizo original que la naturaleza ha hecho y no sabemos cómo. Los geólogos nos dicen mucho, claro, no sólo por las investigaciones directas sino por la historia de la geología. Pero las investigaciones geológicas son, por lo general, específicas. También se pueden hacer investigaciones geofísicas que examinan un gran volumen, pero las investigaciones mecánicas cuando se estudian muestras, los sondeos, son particulares.

Yo diría que nosotros los geotécnicos investigamos muy poco, en comparación con los ingenieros de concreto. Por ejemplo, para construir este edificio con las normas colombianas se exige que de tantos metros cúbicos de concreto se tomen tantas probetas de concreto para ensayar en el laboratorio. El concreto es un material industrial que debe cumplir ciertas especificaciones. Es mucho más probado que el suelo, porque éste no lo fabricamos, lo recibimos sin saber detalles de cómo se hizo.

Para responder a su pregunta, en la construcción de un túnel sí hay sorpresas, casos en los que se esperaba un tipo de macizo y se encuentra otro. Los macizos sedimentarios son los que presentan menos sorpresas, a diferencia de los materiales residuales, que se alteraron químicamente, se crearon *in situ*, y fueron transportados y seleccionados. Por ejemplo, el depósito de sedimentos





en un río depende de la velocidad de las aguas; si es muy alta, entonces solamente sedimentos de relación mayor se depositan en él, y si es un lago o un río con muy baja velocidad, entonces se depositan materiales muy finos, como arcillas. Éste es un proceso de selección de la naturaleza y son los que menos sorpresas dan.

Ahora estoy involucrado en el diseño de los túneles para una carretera de cuatro carriles en São Paulo; es una doble calzada y los túneles son de 20 metros de ancho, con cuatro carriles. Están hechos en un material residual: una roca que se deterioró y se transformó en suelo, pero no lo hizo uniformemente. Los materiales residuales son los que presentan más sorpresas y los sedimentos los que menos. En conclusión, pienso que quizás la calidad en Bogotá no sea la mejor, pero por lo menos pueden esperar que no sean muchas las sorpresas geotécnicas.

### ¿Cómo se desarrolla la obra en un túnel como el de La Línea, en el que hay rocas muy heterogéneas?

Es una dificultad, pero hay métodos que se hicieron para excavar dentro de esta diversidad. Yo no conozco los detalles del diseño del túnel de La Línea, pero puedo decir que en una situación como ésta nunca se avanza en un túnel sin hacer sondeos horizontales para conocer el material y no tener sorpresas.

Hay un ejemplo muy interesante de un túnel construido bajo el mar en Noruega, en el fiordo de Oslo. Claro, es más complicado hacer investigaciones allí.

En el proceso de construcción se encontró una falla geológica muy importante, pero no hubo ningún problema porque siempre se hacían sondeos previos. Simplemente cambiaron el método de construcción. Así que es posible que surjan inconvenientes, pero con la instrumentación adecuada se puede decir si las condiciones van a mejorar más adelante o se van a mantener.

### Qué otras áreas de la ingeniería convergen en la construcción de un túnel (porque nos estamos concentrando en los ingenieros civiles). Qué papel cumplen aquí los ingenieros electrónicos, o los de sistemas...

... O los mecánicos. Hay grandes ingenieros mecánicos que se volvieron excelentes ingenieros geotécnicos. Por ejemplo, yo hice mi doctorado en Mecánica de Rocas.

La mecánica de suelos es muy importante y los ingenieros mecánicos tienen una formación muy apro-

piada para esto. Cuando llegamos al punto de diseñar equipos para la excavación, ellos son importantísimos. Sean del tipo de TBM o para excavación convencional, todos estos equipos han tenido evoluciones relevantes durante los últimos diez o veinte años, precisamente por esa interacción de ingenieros mecánicos, geotécnicos, electrónicos y de automatización... Todas las máquinas hoy en día son autónomas. Tienen mucho de instrumentación, de información y sensores para la medición de la presión del agua, de presión de tierra.

### En cuanto al sistema de *cut and cover*, ¿se va a tener que utilizar en el metro de Bogotá o se podría prescindir de él?

Sin duda, podrían prescindir de él para los túneles de vías; para las estaciones, algunas de estas cosas tienen que usarse, pero como le dije, las estaciones en São Paulo empezaron a hacerse de esta manera, y hoy no. En São Paulo están usando un método que puede ser muy bueno para ustedes: se trata de los pozos secantes, una invención de Brasil.

Para construir un túnel es necesario un pozo profundo para la ventilación, para la salida de emergencia. Debe ser de grandes dimensiones, entre 20 y 30 metros de diámetro, que se excavan como si fuera un túnel vertical.

Todo metro debe tener pozos, por lo menos uno entre dos estaciones. En 1970 se hicieron en São Paulo con *cut and cover*, pero ahora se construyen con concreto lanzado.

Se hace la excavación y se lanza el concreto como una bomba de aire comprimido, a gran velocidad (más de 100 km por hora); entonces la mezcla de concreto, cemento, arena, piedras, etc., se adhiere a la superficie y se compacta. Para la construcción del túnel se emplea un vibrador que retira el aire del concreto y lo compacta.

Hoy en día, los pozos se hacen con concreto lanzado, lo que tiene muchas ventajas. Si hay disponibilidad en la superficie, es más barato y mucho mejor que el *cut and cover* desde el punto de vista estructural, porque los arcos son muy eficientes.

Los espesores de concreto son muy pequeños. Hay un pozo que se construyó para el metro de São Paulo, cerca de un edificio de siete pisos, a solamente dos metros. Es un pozo con 20 metros de diámetro y solamente 20 centímetros de concreto lanzado, que es una cáscara muy eficiente.

Entonces se aprovecha la ventaja de la eficiencia estructural de los arcos. Los *cut and cover* necesitan siempre anclajes para soportar las paredes. La pared tiene un esfuerzo muy grande de suelo para garantizar la seguridad, por lo que se ponen barras de acero con anclajes para asegurarlos. Pero esto es muy agresivo desde el punto de vista urbano, porque aquí puede haber un edificio que tiene sus pilotes, por lo que no es tan fácil de hacer en ciudades. Y si hay agua, estos anclajes van a volverse puntos de infiltración de agua.

Esto no necesita anclajes. Hay compañías de diseño de Europa que vinieron a trabajar en São Paulo, aprendieron a hacer este tipo de estación y lo están llevando a otros países, como los de Asia. Es rápido de construir, seguro y barato porque los espesores son pequeños. Es muy eficiente. Esta es una opción muy atractiva para sustituir los *cut and cover* desde los puntos de vista urbano, de precio, de tiempo de construcción y de seguridad.

### **En condiciones normales, ¿cuánto se demoraría la construcción de una primera línea del metro?**

Yo diría que la construcción de una línea de diez kilómetros de largo puede tardar más o menos cuatro años.

### **Según su experiencia, cómo se logra conciliar la parte administrativa con la técnica, incluso si se crea una empresa independiente, dedicada exclusivamente al proyecto del metro. Cómo hacer para que tenga real autonomía.**

En São Paulo hicieron exactamente eso: establecieron una empresa para el metro de São Paulo. Claro que no

había en Brasil personas con experiencia en un proyecto así, por lo cual se vinculó a gente de Alemania (no sé por qué pero eran de allá), pero durante la construcción de la primera línea se adquirió el conocimiento para gerenciar no solamente el diseño sino la construcción.

Una vez asistí a una conferencia en Washington, en la que el director de ingeniería de la compañía encargada del metro dijo: “La sociedad quiere tener un metro, y por otro lado existen los riesgos de excavar los túneles por debajo de los edificios de la ciudad. Entonces la única manera es delegar esta responsabilidad a una entidad —que en ese caso era el Metro de Washington—. Nosotros —agregó— no podemos darles esta responsabilidad a contratistas. La compañía delegada tiene que estar involucrada en todas las decisiones, incluso desde la concepción, porque mañana no podemos decir “Bueno, se murieron diez personas y la culpa fue del contratista tal”... No, la responsabilidad será de la compañía”.

Yo sé de casos (no puedo citar la ciudad) en los que en vez de instituir una empresa para gerenciar el proyecto encargan, por ejemplo, a la Secretaría de Transporte... Eso no está funcionando y no va a funcionar, es un desastre. O sea, que sí tienen que constituir una empresa, que en la fase inicial va a depender de personas que van a trabajar. Claro que la calidad de la ingeniería en Colombia es de lo mejor.

Digo esto porque además de ingeniero soy profesor y tengo alumnos de Colombia que son excelentes. También sé desde hace tiempo que la calidad de la ingeniería en Colombia es muy buena, entonces lo van a resolver muy rápido.



# Entrevista

**GIANFRANCO PERRI**

**“Hay que pasar trabajos, pero vale la pena construir el metro”**

Por Cristina Salazar Perdomo



Doctor en Ingeniería de Minas del Politécnico de Turín (Italia). Es profesor universitario, ingeniero consultor y proyectista. Ha sido presidente de la Sociedad Venezolana de Geotecnia y es el actual secretario de la Sociedad Venezolana de Obras Subterráneas. Como ingeniero consultor y proyectista, ha desarrollado una amplia actividad en varias áreas de la geotecnia, sobre todo en ingeniería de túneles. Entre los principales trabajos en que ha participado recientemente figuran los de proyectista de los túneles y las estaciones subterráneas de los metros de Valencia y de Caracas, en Venezuela. En la actualidad participa en los proyectos de importantes túneles mineros en Chile y en túneles hidráulicos de Chile, Argentina y Costa Rica. Autor de numerosos artículos técnicos y científicos, y conferencista internacional.

**Primero que todo, considerando la experiencia que usted tiene, hablemos de una obra que capta la atención de los colombianos: el metro de Bogotá.**

Ustedes están hablando del metro de Bogotá hace una docena de años, por lo menos. Es una lástima que se haya perdido tanto tiempo porque la ciudad lo requiere, pues uno de los problemas más graves dentro de los servicios es el del transporte.

Yo vengo a Bogotá en un par de ocasiones al año y cada vez veo que el tráfico es más pesado. O sea, que el metro definitivamente es una necesidad. El aspecto negativo es que cuando se toma la decisión y se empieza a hacerlo hay que esperar unos cinco años para ver algún resultado. Es una obra muy lenta; al principio no se ve, pero después es una obra viva, nunca se acaba. Si la gente conoce los beneficios, está dispuesta a soportar la espera y los inconvenientes. Lo cierto es que si no se hace el metro, Bogotá va a colapsar en el ámbito del transporte.

**Cuando se revisa la historia de los metros en el mundo, se encuentra que los más antiguos tienen 100 o 150 años. Los construyeron antes de que las ciudades crecieran. Pensar en hacer el metro en una ciudad como Bogotá genera muchas preocupaciones. ¿Qué implicaciones va a tener para la capital esta construcción?**

Habrá que hacer sacrificios. Cuando empezaron con los metros de Londres, París y Nueva York, la situación era mucho menos crítica que la de ahora, pero esas son excepciones. La regla hoy es que los metros se construyen en las ciudades ya hechas. Por ejemplo, en Lima: allá empezaron a hablar del metro mucho después que aquí en Bogotá, y ya decidieron hacerlo, licitaron y está



en preconstrucción, y Lima tiene un problema igual o peor que Bogotá. Claro, van a pasar trabajos.

Vamos a hablar de algo más concreto que he vivido: el metro de Caracas. Se empezó a construir en 1978 y hubo inconvenientes porque ya había tráfico pesado, la ciudad topográficamente es muy complicada, la gente sufrió mucho, pero menos mal se hizo.

La línea 1 del metro de Caracas, que va de este a oeste y tiene 20 kilómetros, transporta más de un millón de personas al día, pero el tráfico sigue siendo un desastre porque la ciudad es complicada. No podemos imaginarnos qué sería de Caracas sin metro.

Afortunadamente, la tecnología ha evolucionado bastante en los últimos diez años. Incluso los mismos inconvenientes que hay que sufrir, ahora son “más controlados” que hace una década, cuando la tecnología no permitía aquello que hoy es posible.

**Cómo se logra en una ciudad tan grande concertar la parte gubernamental con la técnica. Obviamente debe haber políticas e inversión, y también quién las ejecute...**

Haya que tener el aval de la política y buena organización. Caracas contó con esa suerte: hubo voluntad política y organización técnica excelente. Todo empezó con una oficina ministerial, justamente al nivel de estudio, pero antes de iniciarse las obras se había constituido una compañía anónima. El accionista era el Ministerio de Transporte, pero tenía bastante autonomía. Ayudó mucho que contaban con un buen presidente, el

ingeniero José González Lander, un funcionario del ministerio. Él montó una organización que se convirtió en el orgullo de Venezuela porque era ejemplo de eficiencia administrativa y técnica, una isla en el contexto. En este momento en que la situación de Venezuela ha cambiado por completo, un número considerable de profesionales han emigrado; para que tenga una idea, el 60 % de los ingenieros del metro de Panamá son venezolanos, gente con 20 y 30 años de experiencia. Ha sido una suerte para Panamá y para estos ingenieros que han conseguido ese desahogo profesional. Casualmente, hay muchos ingenieros venezolanos en Bogotá, debido a la situación en Venezuela. Deberían aprovechar la experiencia de ellos.

**Podría ser una ventaja empezar tarde, porque se pueden evitar algunos errores...**

Eso es fundamental. Caracas tuvo que aprender todo porque no había estas fuentes de experiencia local. El metro de Caracas se diseñó en Estados Unidos.

**Se dice que los suelos de Bogotá no son buenos...**

Eso no es verdad. La tecnología de excavación subterránea ha progresado mucho en los últimos 20 años. Hay pocas situaciones complicadas y para todo se halla solución. El metro de Panamá sí era complicado porque había una alternancia entre materiales muy blandos, como la arcilla, y la roca dura. Por fortuna, en este momento se cuenta con máquinas excavadoras de alta tecnología y la situación se pudo superar.

**En síntesis, ¿qué riesgos geotécnicos habría que afrontar en la construcción del metro de Bogotá?**

Yo no conozco en detalle la geología de Bogotá, pero los problemas de la construcción en entornos urbanos son los mismos en todos los países. La dificultad radica en la interferencia en la superficie, en la estructura preexistente, bien sea servicio, infraestructura o electrificación.

Los desafíos técnicos consisten en organizarse para que la afectación de la superficie sea absolutamente limitada. Hoy en día es mejor que hace 30 años. Hay metodología de monitoreo de instrumentación a lo largo de la franja donde va a ir el metro, se instalan instrumentos para analizar el eventual asentamiento de la superficie e intervenir a tiempo o en el nivel de estudio, e identificar y preventivamente puntos singulares para



intervenir *a priori*. No hay situaciones que impidan hacer el metro en Bogotá.

**¿Hasta qué punto el diseño ayuda a prevenir estas situaciones?**

Los estudios son fundamentales porque hay que identificar los sitios críticos y son claves para escoger la mejor tecnología; hablando de túneles, hay que elegir la máquina en función del material y sus condiciones, aparte de la geometría.

**En ese caso, ¿cuál sería la mejor opción de la máquina?**

Depende de la geología, yo no la conozco en detalle. En terreno suelto, en arena, en arcilla, la máquina debe mantener estable el frente de excavación para que no se produzca asentamiento en la superficie. Hay una máquina que se llama escudos que es un cilindro de acero, dentro del cual se produce todo, y en la cola (parte trasera) se monta un tornillo para el revestimiento prefabricado. Hay mucha tecnología en terrenos granulados, arcillosos, con la que se optimiza el tipo de suelo. Para saber cuál es mejor se debe conocer la geología mediante la perforación. Tengo entendido que en Bogotá se han hecho varias campañas de perforación.

**Algunos dicen que el metro superficial es mucho más económico que el subterráneo, pero que a largo plazo este último tendría más ventajas.**

En una ciudad como Bogotá, me atrevería a decir que no tiene sentido hacerlo superficial. La razón fundamental es que es mucho más costoso el subterráneo, en cuanto a inversión, pero la objeción principal que tendría con un metro superficial sería el inconveniente de la interferencia, que por supuesto es mucho más grande que en el subterráneo. Además, la capacidad de un metro en superficie nunca puede alcanzar la del subterráneo, por el tamaño de los trenes, el nivel de frecuencia de éstos y el tamaño de la estación, que permiten transportar cinco o diez veces más gente. Pienso que sería un error orientarse hacia la superficie porque habría ese doble inconveniente. Se ahorraría dinero en la inversión y finalmente no sería suficiente. Esa es mi objeción.

Además, Bogotá no es una ciudad que se preste técnicamente para un metro superficial. Una de las pocas ciudades del mundo apta para este tipo de metro es Miami, porque es una zona plana, está adherida a corre-

dores muy sencillos, muy fáciles y no hay interferencia. De todas formas, el metro de Miami es muy pequeño y transporta pocas personas. Es una ciudad que está tan extendida que el metro es poco eficiente. Hay que moverse en carro porque no hay polo de generación y de transporte bien definido.

**En cuanto al mantenimiento y la preservación del metro subterráneo en comparación con el superficial, ¿cuál es la diferencia?**

El túnel tiene la ventaja de que es mucho más fácil de mantener. Es difícil de construir, pero una vez que se ha hecho requiere poco mantenimiento, mucho menos que el superficial porque no está expuesto a la intemperie.

**En cuanto a la seguridad, entiendo que también el metro subterráneo tiene una ventaja.**

Sí. El metro subterráneo es mucho más seguro ante un sismo, por ejemplo, que el túnel elevado. El problema del sismo no es cuánto se mueve la tierra, porque no es mucho. La dificultad está en las vibraciones y si a una estructura de superficie se le mueve el piso, arriba comienza a moverse y se cae. El túnel tiene que desplazarse por el terreno y éste no lo hace mucho. Las vibraciones de un sismo en el terreno son muy pequeñas y los daños que produce en un túnel subterráneo no se comparan con los que puede ocasionar en uno de superficie.

**En Colombia suele suceder que aunque se elabora un presupuesto, cuando las obras van por la mitad el constructor solicita una adición. ¿Cómo hacer para que no suceda esto?**

Es un problema general, no ocurre solamente en Colombia. Se pueden mejorar los planes desde la licitación para que queden limitados, y el estudio no debe dar oportunidad para que ocurra eso. Los costos aumentan porque la empresa constructora reclama con el argumento de que la situación es peor de lo que se había previsto.

Para que este aspecto quede limitado, hay que hacer una buena especificación en la licitación y el contrato, y un buen estudio, de modo que el dinero destinado se invierta bien; de lo contrario, la empresa va a decir que no tenía información y encontró algo peor. Así es más complicada la discusión.

Ahora, hay que decir que, como se hacen hoy en día los metros, son algo cuyo costo no puede variar mucho.

No es como en La Línea, donde se excava en forma tradicional con explosivos, se derrumba, hay que hacer consolidación... no. Esto no sucedería en Bogotá porque aquí se metería una máquina que sólo pararía hasta que terminara; tendría que haber algo muy grave para frenar el avance y hacer alguna intervención. La excavación con máquina se presta menos a los reclamos. El revestimiento y la estructura del túnel son prefabricados, mientras que en la excavación convencional se ponen perno y concreto lanzado antes del revestimiento. Ahí sí puede haber un incremento importante.

### **En el caso particular de Bogotá, ¿el metro iría derecho? Al parecer, hay problemas en una curva...**

Evidentemente, el metro cuanto más derecho es mejor, aunque se puede diseñar con curva. La máquina tiene un límite de curvatura, pero esto no se decide durante la excavación sino en el proyecto. Normalmente se prefiere que la curva no sea inferior a un radio de 300 o 350 metros, y hay que conocerla *a priori*; se hace en un ángulo recto, siguiendo una curva; sin embargo, se puede cambiar 90 grados la dirección de un túnel y la máquina lo permite.

### **¿Cuáles han sido los problemas más frecuentes en la aplicación del sistema *cut and cover* y en el sistema EPB?**

El *cut and cover* consiste en hacer una zanja corta y se tapa; en su interior se construye el cajón del tren. Para empezar, el *cut and cover* es la forma más económica y menos profunda. El inconveniente es que hay interferencia en la superficie porque tiene una zanja a lo largo.

En cuanto a las estaciones, hay dos formas de hacerlas subterráneas: cortándolas, construyéndolas y tapándolas, o excavándolas como si fuera un túnel, lo cual es muy complicado y costoso.

En Caracas, en la línea 5, después de 30 años se está intentando hacer alguna estación subterránea completamente. ¿Por qué? Para no interferir en la superficie. Hay que hacer un hueco grande y durante unos cuantos meses debe estar abierto, por lo que se debe construir un puente temporal u otra intervención. En cambio, si la estación la construyen desde abajo, como si fuera un túnel, nadie se entera arriba. Así como el túnel es "fácil" de hacer, la estación no siempre se puede construir bajo tierra y, además, es muy costosa. Estadísticamente, se hace en *cut and cover* la estación, pero toda la línea se ha

hecho con este sistema en algunos sitios, como República Dominicana, porque es mucho más económico y hay corredores relativamente libres en superficie. Se puede hacer si está bien programado y en un tiempo más o menos corto.

También se pueden hacer algunos tramos subterráneos, por ejemplo en el centro de la ciudad, para no interferir. En el tren de Valencia, en Venezuela, todo el proyecto estaba previsto en *cut and cover*. Cuando la empresa que ganó la licitación analizó el problema, les ofreció hacer una parte en túnel en la parte más problemática de la ciudad, lo que les costaría un poco más, no mucho, pero se ahorrarían el problema de la interferencia. Aceptaron y finalmente el metro en la periferia se hizo como estaba previsto, en *cut and cover*, y luego se fue profundizando hasta que entró en subterráneo.

### **¿La construcción del metro en Bogotá implica riesgos ambientales de algún tipo?**

No. Los riesgos son de molestia temporal. Un túnel no interfiere en el ambiente sino en el aspecto hidráulico, a veces. Si se hace en una montaña, se vuelve como un drenaje y agota el nivel freático en un campo cultivado, por ejemplo. Una vez que se completa el revestimiento, se restablece en unos meses el sendero. Sí ha habido inconvenientes en territorio agrícola con la construcción de túneles, pero no es el caso de Bogotá. De todos modos, el cambio del subsuelo es temporal y con la máquina es menos fuerte porque excava el túnel muy rápido, de 20 a 30 metros al día.

### **En un túnel como el de La Línea, el equipo sí estaba más expuesto a un derrumbe. ¿En un túnel urbano esos riesgos disminuyen?**

Los riesgos son menores y la máquina EPB, que es la más evolucionada, garantiza que no va a haber derrumbes. La EPB es una rueda que va excavando y sencillamente con un lodo mantiene presión al frente, o sea, que no hay posibilidad de derrumbe; además, eso se regula electrónicamente, como si estuviese en un submarino. El operador maneja esto para que la presión sea constante, porque si aplica una presión alta se levanta el terreno y si es baja hay un derrumbe. Entonces, lo que pueda pasar, que lamentablemente pasa, son accidentes. Uno de los más graves en la historia de los túneles urbanos ocurrió en Portugal: la máquina EPB, muy bien diseñada, produjo un derrumbe y se

llevó una casa completa. Hubo un muerto. La falla se debió a que había un pozo séptico que puso en conexión la excavación con la superficie. Eso fue por falta de control y monitoreo.

Hoy en día se construyen túneles de metro en todo tipo de terreno: en el desierto, como en Dubái, o en rocas, como en Montreal. Son entre 120 y 150, y no hay accidentes porque las máquinas han mejorado mucho.

**¿Esta tendencia mundial a construir túneles es porque no hay mucho espacio en la superficie, por el avance de la tecnología, o de todo un poco?**

La obra subterránea no se limita a los túneles. En el mundo hay obras subterráneas, como teatros e instalaciones deportivas. En Montreal, donde la temperatura es de menos 20 grados y nieve durante la mayor parte del año, no salen a la superficie, todo es subterráneo: centros comerciales, escuelas, lugares de trabajo. Claro, les favorece que el subsuelo es roca, granito, entonces es relativamente fácil y estable.

En Suecia hay canchas de baloncesto, teatros, todo subterráneo. Lo bueno es que tienen roca fuerte, solamente se requiere excavar. La obra subterránea impacta menos el ambiente.

**¿La construcción del metro en Bogotá va a alterar menos el diario vivir de los ciudadanos, o de todos modos habrá que hacer cierres?**

Habría que hacer cierres para las estaciones o en los sitios en los que entran y salen las máquinas, a menos que haya un sitio muy congestionado y se decida construirla bajo tierra, lo cual se puede. Normalmente, si la estación se hace desde la superficie con *cut and cover* hay una molestia porque durante cuatro o cinco meses se va a mantener una calle interrumpida, entonces se desvía el tráfico o se pone un puente temporal mientras se efectúa el trabajo.

Toda esta tecnología ha mejorado mucho, porque antes se hacía el hueco de 15 o 20 metros de profundidad y abajo se empezaba a crear la estación, que es un edificio, se construía de abajo hacia arriba y cuando llegaba al techo se rellenaba, se tapaba con terreno. Eso tardaba mucho tiempo.

Hoy en día, una posibilidad es hacer los muros perimetrales, poner la tapa de concreto inmediatamente y liberar la superficie. Luego se construye el techo y sucesivamente, desde el subterráneo, se excava y se

construyen las losas de mezzanine y de fondo de la estación, y finalmente las demás estructuras complementarias. A esto se le llama método invertido para estaciones urbanas. Es viable en Bogotá. Lo he hecho en Caracas y en Valencia, y estoy trabajando en un proyecto en Tel Aviv (Israel), donde hay estaciones muy importantes de intercambio en centros muy congestionados, y la empresa italiana que ganó la licitación ha ofrecido hacerlo con el método invertido. Les ha gustado mucho la idea porque la diferencia de tiempo es muy grande; se suponía que el hueco iba a estar abierto 18 meses, pero con *cut and cover* serían seis u ocho meses. Hay un costo adicional pero la ventaja es importante.



**¿Se afectan las obras existentes con la construcción del metro? Por ejemplo, si encima hay un puente.**

Cuando se pasa un túnel bajo un puente es igual a cuando se pasa debajo de un edificio importante: hay que conocer la fundación para no interferir. Si es un puente relativamente moderno, que está bien fundado, no hay riesgo de nada. Si hay algún peligro de interferencia, antes de que llegue el túnel se hace una obra complementaria, la contrafundación, colocando unos pilotes adicionales al puente en algunos sitios críticos. Eso se hace antes de que llegue el túnel.

En Buenos Aires no es un metro, pero acaban de terminar una obra hidráulica notable, por un problema serio de drenaje para la ciudad, con un túnel de ocho metros de diámetro que pasaba debajo de un puente antiguo. Solamente en uno de los seis o siete puntos donde había interferencia se tuvo que hacer una obra





de consolidación antes de llegar al túnel. En cuanto al resto había gente que tenía dudas, que decía que era peligroso, pero la empresa dijo que no hacía falta y, en efecto, no fue necesario. Esto sucede porque las máquinas de ahora son muy buenas. Hace 20 años, estas situaciones eran mucho más peligrosas de controlar, pero hoy en día es muy fácil.

**Usted comentaba ahora que en Caracas se creó una empresa independiente, autónoma, para la construcción del metro, que es lo que se recomienda en Bogotá. Basado en su experiencia, ¿cómo debe ser el perfil del que la dirija?**

Tiene que ser un técnico especializado con habilidades gerenciales, un perfil difícil de conseguir. Caracas y Panamá tuvieron suerte. En este último se nombró a Roberto Roy, quien venía de gerenciar el Canal de Panamá y ya estaba jubilado. El presidente lo contrató y resultó excelente porque es un ingeniero con mucha capacidad administrativa. Probablemente es más importante el aspecto gerencial, y tiene que ser un ingeniero.

En Colombia se han hecho proyectos hidráulicos, por ejemplo, entonces debe haber numerosos ingenieros con mucha experiencia.

**¿Cómo ha sido en otras ciudades el retorno de la monumental inversión que implica la construcción del metro?**

Esa es una cosa que hay que aclarar: la inversión del metro no se recupera. Es una obra social, como un hospital o una escuela. La aspiración de los metros del

mundo es que el retorno cubra el ejercicio. Explico: lo máximo que se espera es que con el pasaje se pague el funcionamiento. Pero de la inversión, olvídense. De hecho, no hay ningún metro privado en el planeta, porque es una inversión social. Hay que administrarla bien porque hay que asumir los gastos fijos de personal y electricidad, que son los que suben los costos del ejercicio de un metro. Además, está el mantenimiento de los trenes, de los rieles, de las escaleras eléctricas.

**¿Cuáles son los principales problemas que se deben afrontar en una construcción cuando hay rocas heterogéneas?**

Es un problema técnico. Hoy en día, en el nivel convencional, hay mucha tecnología para solucionarlo. Los túneles son complicados y siempre se han hecho desde 1850, en situaciones muy difíciles.

Cuando un túnel se vuelve problemático, la forma más sencilla de controlarlo es que en lugar de avanzar por la sección del túnel, se avanza por secciones parciales, se subdivide el túnel, se avanza un túnel de 2x2 y se va ensanchando. Es la manera más elemental, como lo han hecho hace 200 años exitosamente. ¿Cuál es el inconveniente de esa técnica? Que es muy lenta y el ambiente es pesado porque tienen que trabajar en un espacio reducido. Es como lo que vivían los mineros de carbón en el siglo pasado.

El objetivo de hoy en día es construir un túnel de manera mecanizada para alcanzar la sección completa de los mismos diez metros de diámetro, independientemente de que el terreno sea malo. Para eso contamos con excavadoras, martillo demolidor, etcétera. Cuando las cosas se vuelven complicadas, en lugar de parcializar la sección, como se hacía hace 50 o 100 años, hay que hacer algo como consolidar el frente, poner elementos de resina, micropilotes, un presoporte antes de excavar, toda esa tecnología se conoce en Colombia, aunque no haya mucha experiencia con ella. En Caracas se ha utilizado y en el túnel de La Línea también.

El problema es que habría que saberlo *a priori*, no esperar a que suceda el problema, porque entonces hay que empezar a llamar a consultores, a proyectistas. Se debe evitar eso porque se pierde tiempo.

Así es como se hacen los túneles convencionales modernamente. En Colombia hay tecnología e ingeniería para eso, se necesita que el proyecto esté bien concebido.



**En el sector eléctrico se han hecho también obras grandes e incluso de túneles y no ha habido atrasos considerables ni descalabros económicos. ¿Por qué la situación es tan diferente en la infraestructura vial?**

Hay una primera diferencia entre los túneles hidroeléctricos y los túneles viales. En el primer caso, tradicionalmente son más pequeños, de cinco o seis metros de diámetro; claro, hoy en día se hacen más grandes. El 90 % de los túneles hidroeléctricos en Colombia son de cinco metros de diámetro, lo cual es mucho más fácil de controlar que uno de diez metros de diámetro.

Otra cosa importante: los túneles hidroeléctricos se desarrollan normalmente en un ambiente geológico “bueno”: necesitan roca dura, de montaña, de granito. Los túneles viales se producen aquí en Colombia, por lo general en el trópico, en las laderas tropicales, donde el terreno es muy alterado; de hecho, hay un plan muy grande de mantenimiento vial que prevé la construcción

de 50 o 60 túneles para rectificar la vía; para mejorarla, en realidad.

Ahora qué se hace: para evitar el túnel, que cuesta, se construye la vía dando vueltas, pero cuando llega el invierno, se cae media montaña y se para el tráfico. Es un problema grave que tiene Colombia. Tiene que haber un plan ministerial para reducir estos problemas y la manera más sencilla es por medio de túneles. Por lo general, se hacen en terreno malo y construirlos es complicado. Por eso los túneles viales terminan costando más: técnicamente son más complicados y con frecuencia el ambiente es desfavorable.

De todos modos, tengo muy buena expectativa sobre el plan ministerial de rehabilitación vial colombiana, porque creo que es una inversión necesaria. La infraestructura es fundamental. Técnicamente, casi en todos los casos críticos, la manera de resolver los problemas es haciendo un túnel.





# REVISTA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

## Alcance y política

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

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

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

También admite artículos de las siguientes tipologías:

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

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

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

## Requisitos para la publicación de artículos

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

## Scope and policy

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

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

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

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

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

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

## Ruling for publication

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



**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](http://www.4-72.com.co)**