

- ❑ **Conflicto entre crecimiento y equidad.**
- ❑ **Laboratorio de Estructuras y Materiales Alejandro Sandino Pardo.**
- ❑ **Modelación hidrodinámica bi- y tridimensional del nuevo canal con dissipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería, utilizando Ansys Fluent.**
- ❑ **Lineamientos de seguridad vial para la prevención de la accidentalidad vial en los corredores del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP). Caso de estudio: corredor de la avenida calle 72.**
- ❑ **Estudio de la calidad trófica del humedal Gualí - Tres Esquinas.**
- ❑ **Correlaciones de ensayos de campo SDMT, CPT y laboratorio para caracterización de arcillas en el sector comprendido entre la calle 127 y La Caro, en Bogotá.**
- ❑ **Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del sector La Loma del Cabí, en el municipio de Quibdó.**
- ❑ **Evaluación de la metodología de ensayo acelerado de barras de mortero ASTM C 1260 para detectar agregados potencialmente reactivos y las medidas de mitigación de la reacción álcali-sílice ASTM C 1567.**
- ❑ **Métodos de análisis y diseño para la resolución de problemas de estabilidad de taludes y excavaciones mediante técnicas de soil nailing.**



## CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

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

## REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

<b>DIRECTOR</b>	JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
<b>COMITÉ EDITORIAL</b>	GERMÁN ACERO RIVEROS CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES PAULA XIMENA RÍOS REYES HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
<b>DIRECCIÓN EDITORIAL</b>	CRISTINA SALAZAR PERDOMO
<b>EDICIÓN</b>	<b>DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN</b> JORGE CAÑAS SEPÚLVEDA <b>CORRECCIÓN DE ESTILO</b> ELKIN RIVERA GÓMEZ <b>TRADUCCIÓN Y CORRECCIÓN DE ESTILO EN INGLÉS</b> 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.

## 5 / EDITORIAL

Nuestra educación superior

*Héctor Alfonso Rodríguez Díaz*

## 7-16

### **Conflicto entre crecimiento y equidad**

*Eduardo Sarmiento Palacio*

Las teorías dominantes consideran que las inequidades se generan por razones desconocidas y se corrigen por conducto del crecimiento económico, incluso impulsadas por el mercado. En las formulaciones de la primera y la segunda ley de la economía y de Kuznets, se presume que el crecimiento económico reduce las desigualdades, premisa que fue claramente controvertida en los últimos 30 años.

## 17-21

### **Laboratorio de Estructuras y Materiales Alejandro Sandino Pardo**

*Héctor Alfonso Rodríguez Díaz - Andrea Liseth Vasco Chivatá*

Hace 45 años, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito inició actividades en un pequeño edificio en Usaquén, tomado en arriendo a la curia y donde funcionaba el Seminario Menor. Gracias a la gestión de fundadores y benefactores, a los ocho años de su constitución se logró comprar, con mucho esfuerzo, un lote en el norte de la ciudad, predio llamado hacienda El Otoño.

## 23-35

### **Modelación hidrodinámica bi- y tridimensional del nuevo canal con dissipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería, utilizando Ansys Fluent**

*Jorge Alejandro Mora Uscátegui - Germán Ricardo Santos Granados*

El presente artículo trata de la modelación de la dinámica de fluidos computacional en flujo permanente del nuevo canal de laboratorio a superficie libre, con una estructura de transición que funciona como dissipador de energía más una rampa correctora de líneas de corriente. Se usó el *software* Ansys Fluent para modelar la interfaz agua-aire con el modelo de volumen de fluidos (VOF) y el modelo “Baseline (BSL) k- $\omega$ ” para flujo turbulento.

## 37-46

### **Lineamientos de seguridad vial para la prevención de la accidentalidad vial en los corredores del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP).**

#### **Caso de estudio: corredor de la avenida calle 72**

*Carlos Eduardo Puentes García - Maritza Cecilia Villamizar Roperó*

En Colombia, los accidentes de tránsito son la segunda causa de muertes violentas. Por eso, el objetivo de la presente investigación es plantear lineamientos para la prevención de la accidentalidad vial y encontrar sus causas en los corredores del SITP.

## 47-56

### **Estudio de la calidad trófica del humedal Gualí - Tres Esquinas**

*Manuel Andrés González Malagón*

El humedal Gualí - Tres Esquinas se encuentra a 2535 m.s.n.m., abarca un área aproximada de 1294,3 hectáreas y está ubicado en la parte central de la cordillera Oriental, en el occidente de la sabana de Bogotá, entre los municipios de Funza, Mosquera y Tenjo, a un costado de la Troncal de Occidente.

## 57-66

### **Correlaciones de ensayos de campo SDMT, CPT y laboratorio para caracterización de arcillas en el sector comprendido entre la calle 127 y La Caro, en Bogotá**

*Íngrid Paola García*

Este artículo tiene como objetivo dar a conocer la caracterización de las arcillas que se encuentran comprendidas entre la calle 127 y La Caro, en la ciudad de Bogotá. Para lo anterior, se tomaron en cuenta ensayos básicos de laboratorio (humedad del suelo, límites de Atterberg, compresión inconfiada y consolidación) y ensayos de campo (CPT y SDMT).

## 67-71

### **Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del sector La Loma del Cabí, en el municipio de Quibdó**

*Óscar Eduardo Guerrero Chapal - Jairo Alberto Romero Rojas*

En este artículo se presentan los resultados de la evaluación de los procesos que conforman el sistema de potabilización, su operación y su capacidad de abastecimiento.

## 73-82

### **Evaluación de la metodología de ensayo acelerado de barras de mortero ASTM C 1260 para detectar agregados potencialmente reactivos y las medidas de mitigación de la reacción álcali-sílice ASTM C 1567**

*Stefanny Bolívar Murcia - Nancy Torres*

En el presente artículo se exponen los resultados de un proyecto de investigación en el que se evaluó la potencial reactividad de tres agregados del territorio colombiano en combinación con dos tipos de cementos y dos relaciones agua-cemento, con el ensayo ASTM C 1260 de barras de mortero. De las muestras reactivas, se evaluó la efectividad de materiales cementantes para mitigar la reacción álcali-sílice, en el ensayo ASTM C 1567 de barras de mortero.

## 83-93

### **Métodos de análisis y diseño para la resolución de problemas de estabilidad de taludes y excavaciones mediante técnicas de *soil nailing***

*Carlos Germán Niño Martínez - Carlos Eduardo Rodríguez Pineda*

En este artículo se presentan los resultados de un estudio de los principales aspectos que inciden en el comportamiento de las estructuras de *soil nailing* (suelo claveteado), la interacción entre los elementos principales del sistema, sus variables de comportamiento y su contribución a la estabilidad global del sistema.

## 95 / ALCANCE Y POLÍTICAS

# Editorial

## Nuestra educación superior

**HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ**

Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Miembro del Claustro y del Consejo Directivo.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co

Las instituciones de educación superior —en particular, las universidades— tienen grandes compromisos con la sociedad y, por tanto, muchos retos. Esencialmente, se habla del papel que deben cumplir en la solución de las necesidades de la sociedad, sobre todo de sus necesidades básicas. La sociedad se ha transformado, su población es otra y su esperanza de vida aumentó; se comunica de otra manera, y los avances tecnológicos muestran cada vez más que todo es posible.

Tomando como referencia dichas consideraciones, es necesario preguntar cuántos de estos cambios son resultado del trabajo desarrollado por las universidades y, en especial, por cuáles universidades. Así mismo, es bueno reflexionar sobre cómo se beneficia la sociedad de manera inmediata con esta labor y cuánto tiempo se debe esperar, una vez que se han conseguido resultados positivos, para que las comunidades más necesitadas obtengan tal beneficio. Tampoco se puede desconocer que buena parte de esta transformación tecnológica es el resultado de intereses particulares, de empresas muy grandes que tienen como principal objetivo alcanzar unos buenos resultados económicos.

Es frecuente hablar del trabajo de investigación que se desarrolla en prestigiosas universidades, pero no es tan frecuente mencionar que esto es posible gracias a los ingentes recursos que están dispuestos a invertir algunos pocos. Así, cuando el Estado o el sector privado

tienen una necesidad, pueden contratar a un grupo de profesionales para encontrar la solución.

A mi juicio, las condiciones en Colombia son diferentes, particularmente porque no se dispone de los mismos recursos y de las mismas oportunidades. Las universidades deben asegurar unos índices de calidad, lo cual en principio es adecuado, sobre todo hoy, cuando se requieren producción intelectual, producción de investigación y publicación de resultados para obtener un reconocimiento, para ser pares de universidades reconocidas y, de ser posible, para tener visibilización en el ámbito internacional. Cabe preguntar si con esta desigualdad evidente esto es posible y, entonces, cómo se debe enfrentar dicho reto.

En mi opinión, este reto se puede asumir si se piensa en Colombia. Hay que desarrollar una investigación aplicada que atienda prioritariamente nuestras necesidades, con recursos provenientes del Estado y del sector privado, pues de otro modo las universidades afrontarán dificultades, en especial las privadas. Si esta alternativa es adecuada, se ha de tener claro cuál es la formación que debemos ofrecer tanto en el pregrado como en el posgrado, así como cuántos estudiantes de pregrado y de posgrado debemos albergar, para atender prioritariamente nuestras necesidades. No se puede desconocer que hay que mantener una mayor interacción con la comunidad internacional, pero hoy resulta preocupante

que, por estar obsesionados con estos argumentos, en las universidades no planteemos soluciones efectivas a nuestros problemas. Ni siquiera es posible organizar un seminario nacional en el que podemos y debemos compartir los avances del conocimiento, para atender nuestras necesidades locales, que nadie nos resolverá. ¿Será que este es el camino?

No se puede olvidar, como lo menciona el sociólogo José Medina Echavarría, que la educación puede ser un factor de desarrollo económico, pero no por eso constituirse en servidor exclusivo de esta tarea. Por tal razón, resulta indispensable reflexionar de manera urgente sobre cuál es la educación que ofrecemos, qué es lo que cada profesor transmite a sus estudiantes y para qué lo hace.

# Conflicto entre crecimiento y equidad

**EDUARDO SARMIENTO PALACIO**

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

eduardo.sarmiento@escuelaing.edu.co

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

## INTRODUCCIÓN

La persistencia de las desigualdades y su agravamiento en los últimos 30 años no han podido entenderse ni superarse por la concepción equivocada de la distribución del ingreso. Las teorías dominantes consideran que las inequidades se generan por razones desconocidas y se corrigen por conducto del crecimiento económico, incluso impulsadas por el mercado. En las formulaciones de la primera y la segunda ley de la economía y de Kuznets, se presume que el crecimiento económico reduce las desigualdades, premisa que fue claramente contrvertida en los últimos 30 años, cuando el Consenso de Washington, que planteaba la liberación económica a todos los niveles, terminó en el retroceso más acentuado de la equidad en los últimos dos siglos. Por lo demás, se presumía que el crecimiento y la distribución del ingreso eran separables. Las determinaciones guiadas por el mercado para aumentar la producción no afectan la distribución del ingreso.

No obstante la fragilidad analítica y empírica, las creencias se impusieron durante tres décadas, con los resultados vistos. En la mayoría de los países bajó la participación del trabajo en el PIB y se deterioró la distribución del ingreso. Sin embargo, los resultados tampoco fueron suficientes para replantear las teorías y modificarlas. El monumental deterioro de la distri-

bución del ingreso no ha llevado a nuevas visiones. Se mantienen incólumes las ideas de Kuznets y del Banco Mundial, que afirmaban que el crecimiento impulsado por el mercado no afectaba la distribución del ingreso. Más aún, sostenían que el crecimiento no afectaba las teorías centrales de equilibrio general y de separación entre el crecimiento y la equidad. Lo cierto es que las teorías vigentes y aceptadas no explican el retroceso ni ofrecen las soluciones para remediarlo. Se considera que la distribución del ingreso no tiene relación con la estructura económica. No hay una aproximación científica a los factores que causaron el incumplimiento de las teorías que llevan a mantenerlas. Las teorías vigentes reconocen, en cierta forma, que el retroceso no proviene de las economías y puede corregirse sin mayores cambios de fondo. En esencia, consideran que la distribución del ingreso es un problema que puede superarse sin grandes cambios en las estructuras dominantes.

Ni siquiera se ha avanzado en reconocer la tendencia creciente de la brecha entre crecimiento económico y salario, que parece ser el aspecto dominante de las economías en los últimos 30 años. Piketty considera que el deterioro se origina en la elasticidad de sustitución y no altera los postulados de equilibrio general y separación entre crecimiento y equidad. La dolencia puede corregirse sin alterar el mercado ni sacrificar el crecimiento

---

**La causa del deterioro de la distribución del ingreso se encuentra en las acciones orientadas a bajar el salario por debajo de la productividad. La reactivación no se puede lograr con determinaciones específicas, sino con estrategias que operan sobre diferentes frentes.**

---

económico. El profesor Solow completó el diagnóstico en un reciente artículo en el que le da un apoyo sin contemplaciones a Piketty. Sostiene que el menor crecimiento del salario con respecto al crecimiento económico obedece a la elasticidad de sustitución mayor que uno. Como se verá más adelante, el resultado también se presenta con elasticidades menores que uno. En este caso, la inequidad se origina en el mal funcionamiento e ineficiencia del sistema económico. Si el salario se baja y aumenta la tasa de ahorro, el crecimiento económico incrementaría la diferencia entre el retorno del capital y el crecimiento disminuiría, al tiempo que la distribución del ingreso se deterioraría.

Es claro que el diagnóstico dominante gira en torno a la posición de que la distribución es independiente del mercado y la organización económica, y se puede enfrentar sin cambios de fondo en el sistema económico. Más aún, se puede conseguir elevando el crecimiento. No fue suficiente que se presentara el retroceso de 30 años en la distribución del ingreso para contemplar otras hipótesis. Por el contrario, la nueva teoría de Piketty y Solow va más lejos al postular que la distribución del ingreso es independiente del mercado y la organización económica, más concretamente, del equilibrio general y de la separación del crecimiento y la equidad. Y para completar, ambos consideran que la distribución del ingreso se puede mejorar bajando el salario.

La realidad es distinta. Las políticas de mercado para estimular el crecimiento deterioran la distribución del ingreso. No hay ninguna evidencia de que la baja del salario mejora la distribución. La verdad es que hay un abierto conflicto entre el crecimiento y la distribución del ingreso. La solución de mercado para elevar el crecimiento deteriora la distribución del ingreso. Por eso,

la baja del ingreso del trabajo con respecto al PIB y el elevado coeficiente de Gini.

### ECONOMÍA EN DESEQUILIBRIO

La economía opera dentro de un marco de desequilibrio. No se cumplen las condiciones de equilibrio general y de separación entre el crecimiento y la equidad. En este mundo imperfecto, aparece un abierto conflicto que va de la equidad al crecimiento. El mercado no evita que las medidas para impulsar el crecimiento deterioren la distribución del ingreso. La causa del deterioro de la distribución del ingreso se encuentra en las acciones orientadas a bajar el salario por debajo de la productividad. La reactivación no se puede lograr con determinaciones específicas, sino con estrategias que operan sobre diferentes frentes.

La nueva teoría establece que la verdadera causa de la distribución son los desperfectos del sistema, así como las acciones e instituciones orientadas a fijar el salario por debajo de la productividad y bajar la participación del trabajo en el PIB. Entre ellas, la fijación del salario mínimo, las estructuras tributarias indirectas que gravan en mayor proporción al trabajo que al capital, el comercio internacional en economías que carecen de demanda por los productos de ventaja comparativa, y las políticas fiscales y monetarias que mantienen la diferencia entre el ingreso nacional y el gasto.

No se trata de decisiones irracionales. En la mayoría de los casos, son estimuladas por la eficiencia y la máxima producción. En realidad, estamos ante organizaciones movidas por estímulos perversos. La solución sólo se puede lograr con paciencia y regulación estatal. Así, la acción para bajar el salario puede incrementar el ahorro, el comercio internacional y el crecimiento. Lo malo es que los buenos resultados se consiguen a cambio de la distribución del ingreso.

La nueva teoría se puede concretar en dos aspectos centrales. Las economías encuentran el desequilibrio, en el cual no se cumplen los postulados de equilibrio general y separación entre el crecimiento y la equidad. Los dos propósitos están en abierto conflicto.

En fin, el origen del deterioro de la distribución del ingreso es el mal comportamiento de la economía. Nada se gana con acciones concretas mientras persistan las fuerzas inequitativas que se manifiestan por conducto del mercado. La solución es una planeación estratégica

que actúe sobre las inequidades cuando se conocen y en los resultados en el caso contrario. En términos simples, los esfuerzos se deben orientar a resolver y conciliar el conflicto entre el crecimiento y la equidad.

A la luz de estos fracasos, emerge una nueva teoría de la distribución del ingreso. Las economías operan en desequilibrio. No se cumplen las condiciones de equilibrio general ni de independencia entre el crecimiento y la equidad. Los dos propósitos están en abierto conflicto, pues el efecto va de la equidad al crecimiento. La mala distribución del ingreso se origina en las imperfecciones y distorsiones del sistema económico. El mercado no evita que las medidas para aumentar la eficiencia y la producción deterioren la distribución. Así, las acciones generalizadas para colocar el salario por debajo de la productividad aumentan el ahorro, amplían el comercio internacional y elevan el crecimiento, al tiempo que reducen la participación del trabajo en el PIB y deterioran la distribución del ingreso. El mercado no garantiza la eficiencia y la equidad. La armonización de los dos propósitos está condicionada a la intervención del Estado, que no puede realizarse con medidas estilizadas y generalistas. Lo que se plantea es una estrategia amplia sobre distintos frentes, con diversos instrumentos que pueden separarse en dos partes.

La primera consiste en contrarrestar los efectos inequitativos del modelo de crecimiento desbalanceado de ahorro, el capital, la educación y el aprendizaje en el oficio, y la elevación de la productividad externa mediante la elevación del ahorro del capital y la protección al salario mediante aranceles y subsidios. La segunda parte es una abierta prioridad a la distribución orienta-

da a cerrar la brecha entre el crecimiento del producto per cápita y el salario, y garantizar a los grupos menos afortunados un porcentaje de la tributación superior a su participación en la población.

En síntesis, la ampliación de la brecha entre el crecimiento del producto y el salario es el resultado de acciones y distorsiones deliberadas que colocan el salario por debajo de la productividad, bajan la participación del trabajo en el PIB y aumentan el coeficiente de Gini. La solución es un cambio drástico en la estructura y orientación de la economía para reducir el coeficiente de Gini a 0,35 en diez años, dentro de un marco de crecimiento del 5 %.

### SOLUCIÓN FISCAL

No es fácil entender la acogida del diagnóstico y las soluciones de Piketty sobre la distribución del ingreso. El resultado está fundamentado en el funcionamiento y una estructura económica que no corresponde a la realidad colombiana, y en general a la del mundo. Piketty desconoce el fuerte vínculo entre el crecimiento económico y la distribución causada por el ahorro. Considera que la elevación de los impuestos y su orientación al 40 % más pobre por el gasto público no tienen ningún efecto sobre el ahorro, el comercio internacional y el crecimiento económico. Si esto fuera cierto, la explosión del incremento del gasto público en Venezuela no habría tenido efecto sobre la economía. El sistema habría continuado creciendo igual, sin mayores repercusiones sobre el comercio internacional y la actividad productiva. La realidad, de acuerdo con el balance macroeconómico, es muy distinta. La elevación de los subsidios origina un disparo del gasto público que contrae en la misma cuantía el ahorro y la inversión. Los recursos que antes iban a la inversión pasan al consumo.

La explicación es simple. Piketty considera que el crecimiento económico es exógeno al sistema económico; en términos más concretos, es independiente del capital y el crecimiento económico. Por otro lado, cree que en virtud de la elasticidad de sustitución mayor que 1, el aumento de la productividad del trabajo ocasiona un incremento del salario menos que proporcional y una reducción de los ingresos del trabajo en el producto nacional. Así, las economías operan con bajas tasas de crecimiento del producto y deterioro de la distribución del ingreso.





El mal desempeño es un designio de la naturaleza incontrolable. Los países tienden, inexorablemente, a la pobreza y la inequidad. Es claro que el resultado se explica porque el ahorro es insensible a la tasa de interés y no afecta el crecimiento. Por lo demás, en virtud de la elasticidad de sustitución mayor que uno, el salario crece por debajo de la productividad del trabajo. En este contexto, el crecimiento evoluciona lentamente y la distribución del ingreso se deteriora, pero no hay relación entre una y otra.

El drama adquiere grandes dimensiones cuando se llega a las propuestas. La elasticidad de sustitución mayor que uno es la principal causa del deterioro de la distribución del ingreso. La solución es bajar el salario y sustituirlo por una elevación del gasto público de los trabajadores. Pero este gasto significaría una reducción del ahorro que no tiene ninguna influencia sobre el crecimiento económico y el comercio internacional. Así, la teoría de la distribución de Piketty está basada en una multiplicidad de supuestos de la economía que son controvertidos por la evidencia empírica: la verdadera causa de la distribución del ingreso son las imperfecciones del sistema económico, ocasionadas por la alta elasticidad de sustitución.

El diagnóstico de Piketty está fundamentado en los supuestos de que el crecimiento es independiente del ahorro y que la elasticidad de sustitución es mayor que uno. La solución es la elevación de los ingresos del trabajo mediante la ampliación del gasto público en educación, salud y pensiones. En la práctica, significa el incremento en la ampliación de la producción de bienes de baja productividad y el aumento del consumo que, por definición, reduce el ahorro. La mejoría de la distribución del ingreso se consigue a cambio de la

reducción del ahorro, que supuestamente no afecta el crecimiento en el comercio internacional. Se equivocan. La elevación de los ingresos del trabajo por la vía de subsidios es ineficiente y anticrecimiento.

Las teorías del crecimiento y de la distribución del ingreso no han ahorrado esfuerzos para eludir el vínculo del ahorro. La teoría del crecimiento supone que el efecto desaparece a largo plazo, y en las más extremas, en un plazo de menos de diez años. Por otra parte, en las formulaciones de la distribución del ingreso se considera que la distribución impacta positivamente la actividad productiva y la asignación de recursos. Así las cosas, la distribución del ingreso es la consecuencia de un fenómeno incierto que puede corregirse con políticas tributarias que no afectan el crecimiento ni la asignación de recursos. En la práctica, adquiere la forma de un incremento de la productividad del trabajo por encima del salario.

La contradicción sale a flote en las soluciones. La propuesta inmediata de subir el salario resultaría peor que la enfermedad, porque ocasionaría un aumento mayor de la productividad del trabajo y la caída de la participación del trabajo en el producto nacional. Por exclusión de materia, se llega a un subsidio fiscal orientado a colocar el ingreso del trabajo por encima de la productividad. Pero la focalización del gasto está expuesta a serias dificultades administrativas y políticas. La elevación de los salarios requiere un aumento mucho mayor de los ingresos tributarios. En este sentido, el subsidio significa una reducción notable del ahorro que supuestamente no afectaría la capitalización ni el comercio internacional, ni tampoco el crecimiento económico.

El desconocimiento de esta realidad explica muchas de las dificultades de Venezuela y Argentina. Los cuantiosos subsidios estatales para subir el ingreso del trabajo por encima de la productividad generan caídas notables en el ahorro nacional que se manifiestan en descapitalización, aumento del déficit fiscal y déficit en cuenta corriente. Las economías pasan a crecer varios puntos por debajo de la tendencia histórica. Aún más grave, la falta de recursos públicos para financiarlos ha llevado a privatizaciones que les significan rentabilidades estafalarias a los intermediarios. El alto retorno del capital sobre el crecimiento traslada el gasto público y adquiere dimensiones inimaginables. En Colombia, la última privatización les significó a los compradores rentabilidades de más del 15 % anual.

Piketty y Solow sostienen que el crecimiento de la productividad del trabajo por encima del salario es un fenómeno de oferta originado por la alta sustitución entre el capital y el trabajo. El aumento de la productividad del trabajo, que se origina por los diferentes medios, en particular por la innovación, da lugar a un aumento del salario menor. Por simple aritmética, la participación de los ingresos del capital en el producto se incrementa sistemáticamente. Así, la solución a la distribución del ingreso es bajar la productividad del trabajo para que la reducción de salario genere un aumento del empleo y de los ingresos del trabajo. Si la caída del salario se compensa con una elevación de la tributación, los déficits fiscales y su focalización hacia los sectores de menores ingresos, la participación del trabajo en el PIB aumentaría y el coeficiente de Gini bajaría. La argumentación es incorrecta. La relación desproporcional entre la productividad y el salario también se presenta cuando la elasticidad de sustitución es menor que uno.

El primer obstáculo está en que la discrecionalidad sobre la focalización del gasto público es reducida. Para elevar el ingreso del 40 % más pobre se requerirían ingresos fiscales cuatro veces mayores. La distribución del ingreso se conseguiría a cambio de una reducción del ahorro que resquebraja la capitalización, el comercio internacional y el crecimiento. No es exagerado señalar que las grandes dificultades de los países de América Latina, en particular de Brasil Argentina y Venezuela, se originan en el intento de elevar los salarios y reducir las desigualdades con subsidios por conducto del gasto público.

Curiosamente, luego de diez años se vuelve a incurrir en el error de la ley de Say. En la creencia de que el mercado, por sus poderes infinitos, iguala las ofertas y las demandas en todos los mercados, se da por cierto que

---

**Si la caída del salario se compensa con una elevación de la tributación, los déficits fiscales y su focalización hacia los sectores de menores ingresos, la participación del trabajo en el PIB aumentaría y el coeficiente de Gini bajaría. La distribución del ingreso se conseguiría de una reducción del ahorro que resquebraja el comercio internacional y el crecimiento.**

---

la productividad del trabajo determina la producción y los salarios. En lugar de reconocer que el atraso en el salario con respecto a la productividad o el avance del retorno del capital con respecto a la productividad son una consecuencia del mal desempeño de las economías, se presupone que, por el contrario, son la consecuencia de la perfección de las economías. No se entiende que en condiciones de desempleo el salario determine la productividad. La propuesta de solución no podía ser más descabellada: bajar el salario para sustituirlo por un subsidio y el disparo del gasto público. El expediente mejoraría la distribución del ingreso a cambio de una reducción del ahorro que desplomaría la capitalización, el comercio internacional y el crecimiento.

La alternativa es entender que el diagnóstico de la elasticidad de sustitución es falso. La evidencia mundial demuestra que dicha elasticidad está entre 0,40 y 0,60 en los últimos años.

### CONCILIACIÓN DEL CRECIMIENTO Y LA EQUIDAD

No hay ninguna base para considerar que el ahorro y la relación capital/producto no afectan el crecimiento. El aumento del salario por debajo de la productividad es una acción deliberada de los gobiernos y los agentes económicos mediante el ajuste del salario mínimo, la tributación y las prácticas monopolísticas para colocar el precio por encima del costo marginal y el salario de los ejecutivos por encima del de los operarios, el libre comercio, y el más importante, la operación macroeconómica con un gasto por debajo del ingreso nacional. El desmonte de estos factores provocaría una elevación del salario que mejoraría la relación capital/producto y bajaría el coeficiente de Gini. Así mismo, generaría una reducción del ahorro que reduciría el crecimiento económico. El logro de los dos propósitos está condicionado a una elevación del ahorro del capital que podría inducirse con la regulación financiera, el freno de la salida de capitales a los paraísos fiscales y la ocultación de patrimonios.

La propuesta de Piketty está fundamentada en el supuesto de que el crecimiento económico es independiente del ahorro y que el deterioro de la distribución del ingreso, más concretamente el crecimiento del salario por debajo de la productividad del trabajo y del retorno del capital por encima de la productividad, se origina en la elasticidad de sustitución mayor que uno. La so-

lución es la elevación de impuestos y su movilización con subsidios para colocar la capacidad de compra del trabajo por encima de la productividad. El expediente mejoraría la distribución del ingreso y provocaría una reducción notable del ahorro que, supuestamente, no afectaría el crecimiento económico. La distribución del ingreso se mejoraría sin afectar la economía.

El resultado es totalmente distinto dentro de nuestro diagnóstico, que encuentra que el ahorro es el principal determinante del crecimiento económico y la estabilidad de la balanza de pagos. En tales condiciones, la distribución del ingreso se mejoraría a cambio de un desplome del crecimiento económico que ampliaría la brecha con el retorno del capital y el crecimiento del producto. Lo que se gana con una mano se pierde con la otra.

El diagnóstico de Piketty ha tenido receptividad en varios países, como Brasil, Argentina y Venezuela, que han buscado contrarrestar el deterioro de la distribución del ingreso ocasionada por la globalización con subsidios fiscales. En los tres países, la participación del ingreso tributario en el presupuesto nacional es más de 35 % y los déficits fiscales fluctúan entre 5 y 20 %. Las economías experimentaron cuantiosos déficits fiscales y en cuenta corriente que redujeron sus potenciales de crecimiento en más de 2 % con respecto a las tendencias históricas.

Es claro que la propuesta y el diagnóstico están basados en dos teorías equivocadas. Primero, el ahorro no afecta el crecimiento económico. Segundo, el deterioro de la distribución del ingreso obedece a la elasticidad de sustitución mayor que uno. Estas dos políticas falsas pueden llevarse por delante cualquier país.

La alternativa a Piketty y su propuesta son las teorías desarrolladas y presentadas a lo largo de este artículo. Primero, el ahorro y la relación capital/producto son los principales determinantes del crecimiento, que en conjunto con la expansión del empleo explican el 80 % del crecimiento. Segundo, la causa de la distribución del ingreso es el mal funcionamiento del modelo económico, entre los cuales se destacan el bajo ahorro, el comercio internacional y el desbalance macroeconómico. Los tres elementos propician un contexto perverso que facilita e induce a los gobiernos y los agentes económicos a fijar el salario por debajo de la productividad, o lo que es lo mismo, el retorno del capital por encima del crecimiento económico. Se configuró el típico modelo de crecimiento con inequidad.

El diagnóstico deja sin piso la teoría del bienestar y del crecimiento elaborada en los últimos cien años. En la mayoría de las formulaciones se considera que el crecimiento es neutral con respecto a la distribución del ingreso. En la teoría del bienestar se dice que el crecimiento y la equidad son separables, pero para las teorías más reconocidas del crecimiento las economías tienden a un estado en que el capital físico, el capital humano y el producto nacional crecen al mismo ritmo y el retorno del capital se iguala con sus respectivas productividades. El resultado se brinda matemáticamente con una función con Cobb-Douglas de elasticidad de sustitución igual a uno, en la cual la participación del capital y el trabajo en el producto nacional por decisión divina se mantienen inexorablemente constantes.

Todos los desarrollos neoclásicos, desde Solow hasta Kuznets y el Banco Mundial, fueron controvertidos por la información de Piketty, quien muestra que el retorno del capital supera el crecimiento económico, el salario evoluciona por debajo de la productividad del trabajo, el producto nacional crece por debajo del potencial y la distribución del ingreso se deteriora. Estamos ante una evidencia científica que demuestra la invalidez de una teoría, pero no se avanza en una formulación alternativa. En lugar de emplear la evidencia histórica para desconocer la teoría clásica y neoclásica y construir otra más representativa que la realidad, Piketty lanza una cortina de humo con elasticidades de sustitución mayor que uno, que oculta los desperfectos de la teoría vigente. Un error se corrige con otro error. Es como si el postulado de que la Tierra es plana se validara con el supuesto de que se mantiene quieta con respecto al Sol.



No es casual que el principal defensor de la tesis de Piketty sea el profesor Solow, ni más ni menos que el propulsor de la teoría neoclásica que predice que a largo plazo el crecimiento es independiente del capital físico y humano y que todos los factores crecen al mismo ritmo del producto nacional. Solow pretende ocultar el error de su influyente teoría diciendo que la elasticidad de sustitución es mayor que uno sin ninguna prueba científica.

La alternativa al error histórico es la evidencia histórica presentada a lo largo del presente texto y las nuevas teorías del crecimiento y de la distribución del ingreso. El deterioro de la distribución del ingreso se origina en el mal funcionamiento del modelo económico y del mercado. En razón de la baja elasticidad del ahorro con respecto a la tasa de interés, el mercado no conduce al máximo crecimiento y deteriora la distribución del ingreso. La intervención de los gobiernos y los agentes económicos para obtener las ventajas de las ineficiencias los lleva a fijar el salario por debajo de la productividad del trabajo y el retorno del capital por encima de la productividad del capital. El salario mínimo se deprime para elevar el ahorro y equilibrar las balanzas de pagos, las empresas monopólicas establecen precios por encima del costo marginal, los altos ejecutivos se fijan salarios por encima de los sueldos de los trabajadores operativos y la política macroeconómica fiscal y monetaria del banco central autónomo mantiene el gasto por debajo del producto nacional.

Es claro que el deterioro de la distribución del ingreso se origina en acciones para elevar el ahorro y alcanzar el máximo crecimiento. Luego los gobiernos, ante el deterioro de la distribución del ingreso, proceden a elevar

los impuestos y movilizarlos mediante subsidios para colocar las remuneraciones del trabajo por encima de la productividad. El dispositivo mejora la distribución del ingreso a cambio de una reducción drástica del ahorro, que baja el crecimiento económico y genera cuantiosos déficits fiscales y en cuenta corriente.

La contradicción está a la vista. La insensibilidad del ahorro ante la tasa de interés, o dicho en otros términos, el bajo ahorro con respecto a la participación del capital en el producto, se busca contrarrestar con un subsidio a los ingresos del trabajo que reduce aún más el ahorro. La distribución del ingreso se mejora con una reducción considerable del ahorro. No se cumple el postulado central de que la equidad no debe buscarse en la destrucción de la acumulación de capital.

El drama es grande. La falsa hipótesis de Piketty de que la distribución del ingreso se origina en la elasticidad de sustitución mayor que uno induce una política de equidad montada en la reducción del ahorro, o lo que es lo mismo, destrucción de la acumulación de capital. Lo que se gana con la equidad se pierde más tarde con la caída del crecimiento económico y su ampliación de la diferencia con el retorno del capital.

La solución es un nuevo modelo que se aparte de la concepción clásica de crecimiento y bienestar que establece que el crecimiento económico, o en términos más generales, la economía, y la distribución del ingreso, en términos más generales la equidad, son separables. En su lugar se debe reconocer que los dos objetivos están en conflicto por las imperfecciones del sistema económico, entre los cuales los más importantes son el bajo ahorro, la escasa demanda por los productos de ventaja comparativa y el desbalance macroeconómico. El siguiente paso es desmontar los múltiples elementos de represión que condujeron a colocar el salario por debajo de la productividad y contrarrestar sus efectos sobre el ahorro y el crecimiento económico con una elevación del ahorro y la protección selectiva a la industria, la agricultura y el aprendizaje en el oficio.

El conflicto puede sintetizarse en términos de la teoría de instrumentos y objetivos. Lo primero es reconocer que los dos propósitos están relacionados por conducto del ahorro y el comercio internacional y el desbalance macroeconómico. Las acciones para mejorar la distribución del ingreso mediante la elevación del salario y la elevación del impuesto a los que tienen más deteriorarían el crecimiento económico. No se puede



## El mundo quedó abocado a teorías del crecimiento y de la distribución del ingreso que dan lugar a modelos y políticas que ocasionan resultados distintos de los previstos. En muchos casos, causan más daño que bien.

operar sobre una sola variable. Las acciones para mejorar la distribución del ingreso, ya sea por la vía fiscal o de las acciones directas, deben estar acompañadas de otras que contrarresten las secuelas sobre el ahorro, el comercio internacional y el crecimiento. En la práctica, se puede lograr mediante determinaciones para evitar la fuga de capitales a los paraísos fiscales. Si el país no eleva el ahorro, el conflicto entre el crecimiento y la equidad persistirá, como ocurrió en los últimos 25 años.

En fin, la política redistributiva requiere dos tipos de instrumentos. En primer lugar, una acción deliberada para desmontar los desperfectos que colocan el salario por debajo de la productividad, la tributación entre el trabajo y el capital, la protección a la producción industrial con aranceles selectivos a los bienes transables comunes, el ajuste del salario mínimo con respecto a la productividad y el balance macroeconómico entre el gasto y el ingreso nacional. Adicionalmente, se requiere otro tipo de políticas que evite las secuelas negativas sobre el ahorro y el crecimiento económico. En la práctica, se podría lograr con una elevación del ahorro del capital que tomaría la forma de freno a la salida de capitales a los paraísos fiscales, regulación de los márgenes de intermediación financiera e impuestos al capital. Se cumpliría el principio de objetivos e instrumentos. La conciliación del crecimiento y la distribución del ingreso necesitan por lo menos dos instrumentos.

### CONCLUSIONES

El tema de la distribución del ingreso no se orientó adecuadamente. En las teorías dominantes de los neoclásicos, Kuznets y el Banco Mundial, se considera que la distribución del ingreso es independiente de la economía, y en particular, del crecimiento económico.

En los últimos 25 años, la distribución del ingreso se hizo con la idea de que el crecimiento mejora la distribu-

ción del ingreso, o por lo menos, no lo desmejora. Los países se comprometieron en políticas de libre mercado, sin reparar en los efectos sobre la equidad.

En los estudios del Banco Mundial realizados a finales del siglo pasado se encuentra una relación directa entre el crecimiento y la distribución, pero tenue. Sin reparar en la información de series de tiempo históricas, se reafirman los postulados de la teoría clásica y los hallazgos de Kuznets. Se consolida la creencia de que el crecimiento y la distribución del ingreso son independientes y que el efecto va del crecimiento a la distribución. Lo cierto es que del rimbombante estudio no surgió un nuevo pensamiento económico sobre la distribución del ingreso.

El error generalizado estuvo en desconocer el vínculo entre el crecimiento y la distribución del ingreso. No se hizo nada para conciliarlos. El conflicto entre los dos propósitos constituye un serio cuestionamiento a las dos leyes fundamentales de la economía neoclásica. Los estímulos de mercado para elevar el crecimiento se aplican sin reparar en la distribución del ingreso, y las acciones para aumentar la participación del trabajo en el PIB reducen el crecimiento.

Ante el desconcierto de los economistas, emerge Piketty con información de más de un siglo que muestra que los retornos del capital se colocan por encima del crecimiento económico. Como el capital crece más rápidamente que el producto, los ingresos del capital crecen más que el promedio, y como los ingresos de los dueños del capital son mayores que los del trabajo, la distribución del ingreso se deteriora. Así lo confirma el coeficiente de Gini. En los últimos 25 años se encuentra que de cada 100 países, 70 experimentaron retrocesos en el coeficiente de Gini.

Piketty atribuye el comportamiento a la elasticidad de sustitución mayor que uno. El aumento de la productividad del trabajo da lugar a un crecimiento menos que proporcional del salario y una reducción de la participación del trabajo en el PIB. Así, el deterioro de la distribución del ingreso obedece a elementos inciertos y abstractos de la naturaleza, e independientes de la economía. El resultado es abiertamente controvertido por la evidencia histórica. En todos los estudios se encuentra que la elasticidad de sustitución es menor que uno; fluctúa entre 0,4 y 0,60.

La solución de Piketty es un impuesto altamente progresivo, orientado a financiar un subsidio para colocar

el ingreso del trabajo por encima de la productividad. El dispositivo detendría el aumento de los ingresos del capital en el producto y reduciría el ahorro. En virtud de la elasticidad de sustitución mayor que uno, la reducción del ahorro no afectaría el crecimiento económico.

Los resultados son muy distintos a la luz de los resultados derivados en estudios en proceso. Allí se muestra que el capital es el principal determinante del crecimiento económico. En tales condiciones, se presentarían una fuerte caída del crecimiento y un incremento del déficit en cuenta corriente que provocarían serios traumatismos en la economía. En el fondo, se incurre en un error tradicional de suponer que el ahorro es inefectivo y la relación capital/producto, exógena.

El descubrimiento de Piketty es un hecho factual que invalida las teorías clásicas y neoclásicas dominantes. Sin embargo, quedó a medias. No condujo a una teoría que se aproximara más a la realidad. Por el contrario, se limitó a crear una cortina de humo con la elasticidad de sustitución mayor que uno para ocultar los imperfectos que deterioran la distribución del ingreso. El mundo quedó abocado a teorías del crecimiento y de la distribución del ingreso que dan lugar a modelos y políticas que ocasionan resultados distintos de los previstos. En muchos casos, causan más daño que bien. Así, la distribución del ingreso basada en subsidios fiscales para colocar las remuneraciones del trabajo por encima de la productividad tiene una gran responsabilidad en el retroceso de los últimos años de Venezuela y Argentina.

Lo que se planteaba ante las evidencias de Piketty era una nueva teoría que sustituyera las visiones neoclásicas en sus falencias fundamentales. Ante todo, había que reconocer el deterioro de la distribución del ingreso; más concretamente, el retorno del capital por encima del crecimiento económico y el salario por debajo de la productividad del trabajo controvierten las teorías de equilibrio general de Arrow y Debreu, así como las teorías de crecimiento entre Solow y Koopmans hasta Kuznets y el Banco Mundial. De allí se concluye que el mercado no conduce a las soluciones más eficientes, es decir, al máximo crecimiento del producto y el consumo, y que el crecimiento y la distribución no son separables. Por lo demás, la acción de los agentes económicos para apropiarse de las rentas de las ineficiencias reduce la participación del trabajo en el PIB y amplía las diferencias de ingresos.

La teoría de la distribución del ingreso de Piketty está fundamentada en un diagnóstico falso del sistema económico. Primero, el crecimiento económico es independiente del ahorro. Segundo, la caída de la participación del trabajo del producto y el consecuente deterioro de la distribución del ingreso sobre el resultado de la elasticidad de sustitución mayor que uno; el retorno del capital es menor que el crecimiento del producto nacional y el salario aumenta menos que la productividad del trabajo. Los gobiernos se dan cuenta de que sus buenos oficios para elevar el salario reducen más el empleo y los ingresos del trabajo. Ante el deterioro de la distribución del ingreso, proceden a elevar los impuestos y a focalizarlos en la forma de subsidios para colocar las remuneraciones del trabajo por encima de la productividad. La distribución del ingreso mejora, a cambio de una monumental reducción del ahorro que supuestamente no tiene efecto sobre el crecimiento. La contradicción es evidente. El deterioro de la economía y de la distribución se origina en el bajo ahorro y se busca corregir con menos ahorro.

Las cosas son muy distintas dentro de nuestro diagnóstico. Primero, el ahorro es el principal determinante del crecimiento económico. Segundo, la distribución del ingreso es el resultado de los imperfectos de la economía, entre los cuales se destaca la inestabilidad del ahorro a la tasa de interés, o si se quiere, el bajo ahorro, la baja demanda por los productos de ventaja comparativa, el desbalance macroeconómico, los ajustes del salario y los impuestos por debajo del salario mínimo. Los estímulos inducen a los gobiernos y a los agentes económicos a ajustar los salarios por debajo de la productividad. El bajo ahorro configura un abierto conflicto entre la distribución del ingreso y el crecimiento económico. Las acciones de los gobiernos y los agentes económicos para elevar el ahorro impulsan ajustes de salarios inferiores a la productividad.

El desesepero de los gobiernos para mejorar la participación del trabajo en el PIB los lleva a elevar los impuestos y movilizarlos en la forma de subsidios para colocar la capacidad de compra del trabajo por encima de la productividad. La distribución del ingreso se consigue a cambio de una reducción del ahorro que baja el crecimiento económico y amplía la diferencia entre el retorno del capital ( $r$ ) y el crecimiento económico ( $g$ ). La economía tiende a un estado en que  $r$  es mayor que  $g$ , el crecimiento es inferior al retorno del capital, el

salario crece menos que la productividad, el crecimiento económico es inferior al máximo y la distribución del ingreso se deteriora.

La solución de Piketty es un impuesto progresivo y un subsidio al trabajo que cierre la brecha entre  $ry$  y  $g$ . El dispositivo significaría una reducción del ahorro, con serias repercusiones sobre el crecimiento y el comercio internacional.

El debate entre el crecimiento y la equidad puede resumirse o completarse en términos del postulado de instrumentos y objetivos, que es un criterio técnico aplicado en múltiples disciplinas. El mundo se comprometió con la política de elevación del crecimiento, sin reparar en la distribución del ingreso. En unos casos, el propósito se consiguió con un deterioro de la distribución; en otros casos, la distribución del ingreso se buscó con serias fallas y desajustes del sistema económico. En el fondo, se incurrió en el serio error técnico de buscar dos objetivos con un solo instrumento: la política fiscal de impuestos y subsidios. Lo que se planteaba era operar con un instrumento para alcanzar un objetivo y con el otro evitar las secuelas negativas. De todas formas, los grandes errores en materia de equidad tienen que ver con el desconocimiento de su relación con el crecimiento.

Los desaciertos de la distribución del ingreso se originan en serios errores de causalidad. Se encuentran en la tendencia generalizada de la teoría económica de desconocer los efectos del mercado y el crecimiento sobre la equidad. En general, se considera que el crecimiento no afecta la equidad, como lo dicen a viva voz las teorías dominantes de asignación de recursos y crecimiento económico. Lo grave es que se fue más allá al considerar que la distribución del ingreso no afecta el crecimiento económico. Sobre esta confluencia de supuestos se proclama la independencia entre los dos propósitos. El crecimiento no deteriora la equidad, no afecta el crecimiento. En suma, los estímulos a la producción no inciden en la distribución del ingreso, y si lo hicieran, se podría corregir con medidas equitativas que no afecten el crecimiento.

Estamos ante el fracaso de la ciencia económica para orientar las estrategias distributivas en América Latina. Así, los países se han comprometido en estrategias de crecimiento sin reparar en la equidad. Luego de varios años, se observa que las políticas de libre mercado inducen a la inequidad. Del otro lado están países, como Venezuela y Argentina, que han adoptado ambiciosas

políticas distributivas, sin reparar en los efectos sobre el crecimiento. En muchos casos, no se han evitado serios efectos sobre el crecimiento económico.

La conciliación de los dos propósitos no puede lograrse con una sola política, más concretamente, con la simple política fiscal de impuestos y subsidios. Se requiere otra política que contrarreste los efectos negativos sobre el ahorro, el comercio internacional y el crecimiento. En la práctica, se conseguiría con una elevación del ahorro del capital mediante el freno de salida de capitales a los paraísos fiscales, el recorte de los márgenes financieros y la elevación de los impuestos al capital.

## REFERENCIAS

- Aghion, P. & Williamson, J. (1998). *Growth, inequality and globalization. Theory, history and policy*. Raffaele Mantioli Lectures-Cambridge University Press.
- Alesina, A. & Rodrik, D. (1994). Distributive politics and economic growth. *Quarterly Journal of Economics*, 109 (2).
- Alesina, A. & Glaeser E. (2005). Work and leisure in the United States and Europe: Why so different. NBER. *Macroeconomics Annual*.
- Arrow, K. & Debreu, G. (1954). Existence of equilibrium for a competitive economics. *Econometría*, 22.
- Atkinson, A.B. (2015). *Inequality: what can be done?* Cambridge-Londres: Harvard University Press.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (2009). *La era de la productividad. Cómo transformar las economías desde sus cimientos*. Washington, D.C.: BID.
- Benabov, R. (1996). Inequality and growth. NBER. *Macroeconomics Annual*.
- Benerjee, A. & Duflo, E. (2003). Inequality and growth. What can the data say? *Journal of Economic Growth*, 8: 267 - 299.
- Berg, A. & Ostry, J. (2014). *Redistribution, inequality and growth*, Charalambos Tsangarides, IMF Staff Discussion.
- Boushey, H., Bradford DeLong, J. & Steinbaum, M. (eds.) (2017). *After Piketty The Agenda for Economics and Inequality*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Keynes, J.M. (1936). *The general theory of employment, interest and money*. Londres: Palgrave Macmillan.
- 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.
- Lange, O. (1942). Say's law: a criticism and restatement. En *Studies in mathematical economics and econometrics*. Chicago: University of Chicago Press.
- Piketty, T. (2014). *Capital in the twenty-first century*. Cambridge: Harvard University Press.
- Sarmiento, E. (2002). *El modelo propio*. Bogotá: Grupo Editorial Norma - Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sarmiento, E. (2014). *Distribución del ingreso con crecimiento es posible*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Solow, R. (2017). Thomas Piketty is Right. En capítulo 1 de *After Piketty*.
- World Bank (2008). *World Development Report 2006: Equality and Development*. Nueva York: Oxford University Press.

# Laboratorio de Estructuras y Materiales Alejandro Sandino Pardo

Alejandro Sandino Pardo Laboratory of Structures and Materials

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ<sup>1</sup> - ANDREA LISETH VASCO CHIVATÁ<sup>2</sup>

1. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Constructor responsable del edificio Alejandro Sandino Pardo.

2. Ingeniera de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Ingeniera residente del Laboratorio de Estructuras y Materiales Alejandro Sandino Pardo.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - andrea.vasco@escuelaing.edu.co

## INTRODUCCIÓN

Hace 45 años, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito inició actividades en un pequeño edificio en Usaquén, tomado en arriendo a la curia y donde funcionaba el Seminario Menor. Gracias a la gestión de fundadores y benefactores, a los ocho años de su constitución se logró comprar, con mucho esfuerzo, un lote en el norte de la ciudad, predio llamado hacienda El Otoño. El predio tenía dos galpones, utilizados para el acopio de semillas, fertilizantes y el mantenimiento de maquinaria, teniendo en cuenta la explotación agrícola que se realizaba por esa época en este sector de la ciudad. Recuerdo que el agua del predio se tenía gracias a una concesión otorgada por la CAR de una fuente ubicada arriba de la carrera 7.<sup>a</sup>, cerca de la calle 245, ya que cuando se compró este predio no había agua potable ni sistema de alcantarillado.

El crecimiento de la Escuela exigió su traslado parcial a este sitio. Se tomó la decisión de empezar la adecuación de uno de los galpones para que allí pudieran operar los laboratorios de Ingeniería Civil y se realizaran

las prácticas a los estudiantes del único programa de ingeniería que se ofrecía por entonces. Fue así como el galpón seleccionado lo utilizaron, y aún lo utilizan, los laboratorios de Estructuras y Materiales, Hidráulica, Saneamiento Ambiental y Suelos. Recuerdo que en el caso particular del Laboratorio de Hidráulica, para su diseño y construcción nos asignaron generosamente unos 250 m<sup>2</sup>, sin ningún tipo de mobiliario, ni adecuación, ni oficina, y esta zona se convirtió en nuestro primer espacio de trabajo en la Escuela.

Quien me entregó este espacio fue el primer y único director que han tenido los laboratorios, el ingeniero Alejandro Sandino Pardo. El doctor Sandino, como todos lo conocíamos, fue en particular un gran señor y una gran persona. Infortunadamente, lo perdimos siendo muy joven, pero nos dejó un gran legado. Sus cualidades técnicas y científicas, así como sus investigaciones y experimentaciones, principalmente en el campo de las estructuras y los materiales, lograron transmitir ese gusto a muchos de sus discípulos de la Escuela.



**Fotografía 1.** Laboratorio de Estructuras Alejandro Sandino Pardo, de la Escuela Colombiana de Ingeniería (cortesía Argos).

Se acordó que el Laboratorio de Estructuras y Materiales debía llevar el nombre de Alejandro Sandino Pardo y que debía ser el primer edificio de laboratorios construido por la Escuela. A pesar de que no fue el primer edificio de laboratorios de la Escuela, como era el deseo de todos, y después de muchos anteproyectos y proyectos con diseños definitivos, hoy la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito presenta este proyecto para honrar los adquiridos con la sociedad y con el país en su declaración de principios.

Por encargo del Consejo Directivo de la Escuela, desde hace un poco más de dos años un grupo de profesionales egresados de la Escuela y de la empresa privada comenzó la concepción, diseño y construcción del edificio del Laboratorio de Estructuras y Materiales Alejandro Sandino Pardo, que hoy se culmina con mucho orgullo. A continuación se presentan, de manera general, las principales características de este importante proyecto.

## CONCEPCIÓN ARQUITECTÓNICA

El edificio del Laboratorio de Estructuras y Materiales Alejandro Sandino Pardo se concibió, manteniendo las características de desarrollo del campus de la Escuela, en tres escalas de diseño arquitectónico, que contienen la escala de paisajismo, de conjunto y detalle.

En la escala de paisajismo, el urbanismo fue una pieza clave para la configuración central del campus, como remate en el vínculo entre los laboratorios y el futuro edificio del Centro del Conocimiento y la Información, en el que se incluye la futura biblioteca. Por tal razón, el Laboratorio de Estructuras y Materiales se plantea en forma de escuadra para configurar una plazoleta de acceso que lo vincula con el recién construido Conjunto de Laboratorios, edificio I. También está planteado como remate del futuro acceso para la Escuela, en el costado occidental de su predio.

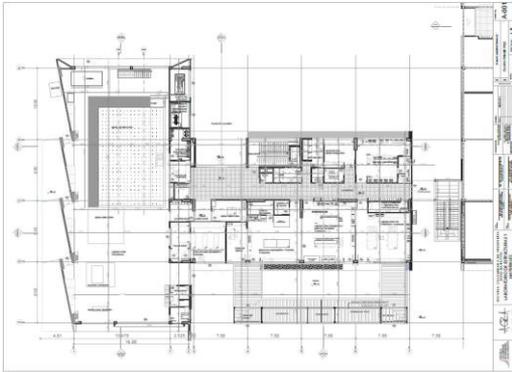
En la escala de conjunto, es la pieza final que configura los edificios de laboratorios de la Escuela, cuyos dos bloques se acoplan por un eje central que es la columna principal y que en los tres pisos permite su conexión a través de dos puentes ubicados en el segundo y tercer nivel, además de que cuenta con una marquesina de vidrio en la cubierta. Esta configuración arquitectónica se complementa con la vista de una nave principal, en la que están ubicados el elemento más significativo y el símbolo principal del Laboratorio de Estructuras, su muro de reacción.

La nave principal está concebida como un gran espacio de experimentación física y numérica para modelos de estructuras, que incluye un enorme muro de reacción, así como equipos, elementos y dispositivos que permiten el desarrollo adecuado en las actividades investigativas y pedagógicas. Este espacio de trabajo se complementa con un importante edificio de apoyo en el que están ubicados, en el primer piso, diferentes laboratorios de materiales, y en los dos pisos restantes están las oficinas, un salón de sistemas y un auditorio para fines educativos.

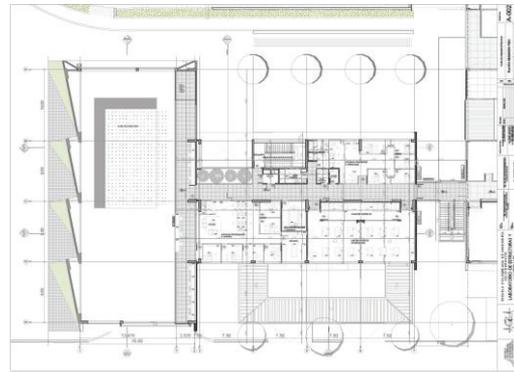
A renglón seguido se muestran las plantas del primer, segundo y tercer piso (figuras 2, 3 y 4).

Por último, como ya se mencionó, la escala de detalle concibe el proyecto técnicamente como un edificio didáctico e inteligente, que incluye una estructura en concreto reforzado en el que los materiales se exponen a la vista de manera explícita: concreto, ladrillo, redes hidráulicas, sanitarias, de incendio, eléctricas, de automatización y de control.

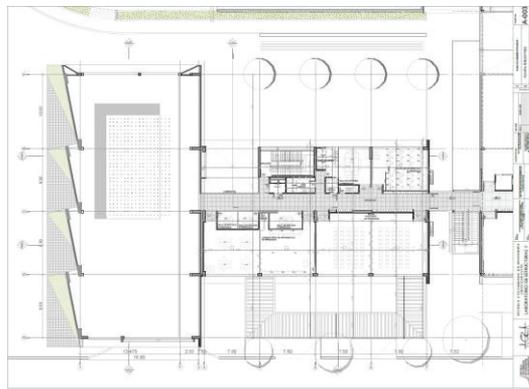
La cubierta del edificio, de 1080 m<sup>2</sup>, utilizada para el montaje de paneles solares, ha permitido la construcción de un Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica para la maestría de Ingeniería Eléctrica. El sistema tiene una capacidad instalada de 110 kW, aproximadamente.



**Figura 1.** Planta del primer piso.



**Figura 2.** Planta del segundo piso.



**Figura 3.** Planta del tercer piso.

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO

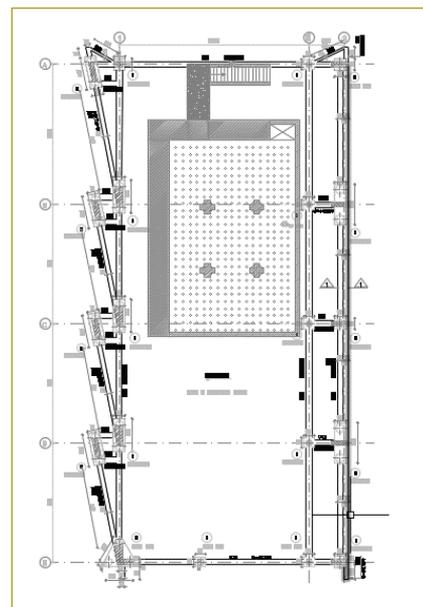
### Nave principal

En el edificio de la nave principal se construyeron 54 pilotes, de los cuales 31 pilotes están ubicados en el perímetro de la nave principal, tienen un diámetro de 0,60 m y profundidades que varían entre 28 y 40 m; los restantes, que soportan el muro de reacción, se describirán más adelante. Las vigas de cimentación del laboratorio tienen una altura de 60 cm y anchos entre 30 y 40 cm. Seguidamente, se presenta una vista en planta de este espacio de trabajo (figura 5).

Además, el espacio de la nave principal tiene un semisótano y un puente grúa de 20 toneladas; estará dotado con equipos esenciales, como nueve actuadores dinámicos, complementados con un sistema de bombeo y refrigeración para su utilización adecuada, los cuales permiten generar cargas y desplazamientos dinámicos en estructuras que haya que analizar; también se cuenta con una máquina universal, mesa vibratoria, etc.

La fachada de la nave principal está hecha en ladrillo y concreto a la vista. El costado norte tiene una gran fa-

chada en vidrio, en tanto que por el costado sur se tiene una puerta enrollable de más o menos 10 m de altura.



**Figura 4.** Planta de la nave principal. Muro de reacción.

## Muro de reacción

Para la cimentación del muro de reacción se construyeron 23 pilotes de 70 cm de diámetro, con longitudes que varían entre 40 y 46 m, y cada uno soporta entre 69 y 156 t. Sobre ellos se construyó una placa aligerada de 1,20 m de altura, placa en la cual nace el muro de reacción. Sobre esta placa se construyó un semisótano de 2,0 m de altura, espacio dispuesto para realizar maniobras de amarre y transición de los trabajos que deben hacerse por encima de la placa de piso fuerte de 1,2 m de altura y en el que se anclarán las estructuras que se van a ensayar en el muro de reacción. Este muro está diseñado en forma de L, con el fin de probar elementos en dos direcciones, simulando un sismo o similares. El muro, que tiene un espesor de 1,5 m, y una L con longitudes de 15,5 m y 8,7 m, respectivamente, y 13 m de altura, se construyó con concreto autocompactante y fluido de 6000 psi, con macro- y microfibras para controlar los cambios de temperatura durante los procesos de curado. Para permitir el anclaje de las estructuras que se puedan ensayar, en toda la superficie del muro se tienen pasadores, distribuidos cada 0,50 m.

## PROCESO CONSTRUCTIVO

Por ser un muro con espesor de 1,5 m, altura de 13 m y una L con longitudes de 15,5 m y 8,70 m, en ese orden, según la clasificación de la ACI, un concreto masivo autonivelante fue el más adecuado. Como se sabe, para este tipo de concreto fue necesario tener ciertas consideraciones y cuidados especiales debido al notable incremento en la temperatura durante su proceso de curado.

Para conocer los posibles incrementos de temperatura, se construyó un cubo de prueba de 1,5 m de lado, con tres termocuplas ubicadas estratégicamente, para permitir el monitoreo en tiempo real. Con los resultados obtenidos, el proveedor y el asesor en concretos contratado por la Escuela ajustaron la mezcla, para no tener contratiempos en los procesos constructivos del muro.

El proceso de fundido del muro se estableció en cuatro etapas. En la primera etapa se fundió la placa aligerada de cimentación, con 1,0 m de altura. Las restantes fundidas se efectuaron en alturas de cerca de 4 m cada una. En cada uno de los tramos fundidos se instalaron estratégicamente termocuplas para obtener mediciones en tiempo real, con el objetivo de revisar el gradiente

de temperatura adecuado para el desencofrado y para que el muro de reacción no presentara grandes choques térmicos, teniendo en cuenta los grandes cambios de la temperatura ambiente.



**Fotografía 2.** Muro de reacción, nave principal.

## Edificio de apoyo

La cimentación de este edificio está compuesta por 61 pilotes que tienen una longitud de 30 m, para soportar cada uno cargas de aproximadamente 50 t. La sección de las vigas de cimentación para este edificio es de 0,35 × 0,60 m.

Las fachadas norte y sur del edificio son en aluminio y vidrio traslúcido y la fachada oriental está concebida arquitectónicamente con pañete a la vista.

En los espacios del primer piso se encuentran un túnel de viento y diferentes laboratorios que permiten realizar ensayos de estructuras y materiales.

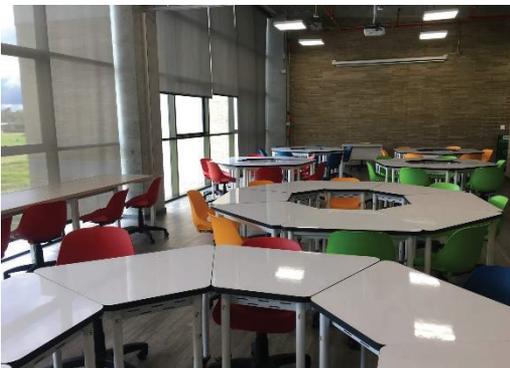


**Fotografía 3.** Laboratorio de Materiales.

Aquí se encuentran los laboratorios de cementos, de ensayos de compresión y tensión, RAS, microscopía y un espacio para la mesa vibratoria. Adicionalmente, se tienen cuatro cuartos con temperatura y humedad controlada, necesarios para el diseño de mezclas.

En el segundo piso del edificio, los espacios están distribuidos de la siguiente manera: Laboratorio de Modelos con capacidad para 40 estudiantes, 11 oficinas para profesores e investigadores, 5 puestos de trabajo para asistentes graduados y sala de reuniones.

En el tercer piso se encuentra el laboratorio de cómputo de estructuras con 40 puestos de trabajo, un laboratorio con 50 puestos de trabajo para el programa de Ingeniería de Sistemas, un auditorio divisible y con capacidad para 90 personas, una sala de teleconferencias y 3 salas de trabajo colaborativo.



**Fotografía 4.** Laboratorio de Ingeniería de Sistemas.



**Fotografía 5.** Pasillo del tercer piso.

Sobre la cubierta de 1000 m<sup>2</sup> en lámina Monowall de 30 mm se apoyan los 318 paneles solares, que junto con 4 inversores y 2 transformadores conforman el sistema de energía solar fotovoltaica, cuya capacidad instalada, como se mencionó, es de 110 kW.

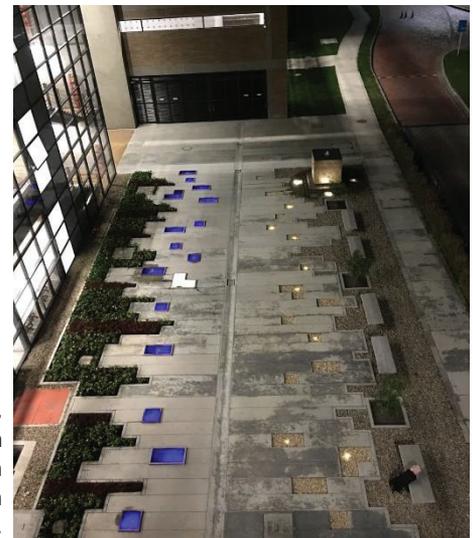


**Fotografía 6.** Paneles solares sobre la cubierta del edificio.

El edificio cuenta con un patio de maniobras, con áreas para el recibo de muestras y zonas de depósito de materiales. En este espacio se encuentran los tanques de curado y es posible hacer diferentes montajes y la preparación de mezclas.

En el costado sur del edificio se construyó la vía de servicio. Tiene una longitud de 200 m y un ancho de 5 m. A la entrada de la nave principal se construyó un sobrecancho de 10 m para permitir las maniobras que deban realizar los vehículos de carga que deseen ingresar a la nave principal.

La entrada principal al edificio de Laboratorio de Estructuras y Materiales es un juego de lozas rectangulares en concreto de 50 cm de ancho, con figuras ortogonales en las que se construyó un cubo fuente en concreto, 16 fuentes de agua, 16 fuentes en piedra y bancas de concreto. Este espacio está decorado con jardines de hiedra, sietecueros rastroso y árboles de falso pimienta, que generan un ambiente muy tranquilo.



**Fotografía 7.** Panorámica de la entrada principal de la plazuela.

# Modelación hidrodinámica bi- y tridimensional del nuevo canal con disipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería, utilizando Ansys Fluent

Bi- and three-dimensional hydrodynamic modeling of the new energy-dissipator enabled channel from Escuela Colombiana de Ingeniería, using Ansys Fluent

JORGE ALEJANDRO MORA USCÁTEGUI<sup>1</sup> - GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS<sup>2</sup>

1. Ingeniero sanitario. Maestría en Ingeniería Civil.

2. Director de tesis.

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

jorge.mora@escuelaing.edu.co - german.santos@escuelaing.edu.co

Recibido: 07/10/2017 Aceptado: 11/11/2017

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

## Resumen

El presente artículo trata de la modelación de la dinámica de fluidos computacional en flujo permanente del nuevo canal de laboratorio a superficie libre, con una estructura de transición que funciona como disipador de energía más una rampa correctora de líneas de corriente. Se usó el *software* Ansys Fluent para modelar la interfaz agua-aire con el modelo de volumen de fluidos (VOF) y el modelo “Baseline (BSL) k- $\omega$ ” para flujo turbulento. Los resultados fueron comparados y analizados con mediciones realizadas en un modelo físico. Se hicieron modelaciones comparativas, con topologías sin disipador de energía y sin rampa, de parámetros como la altura de la lámina de agua, energía mecánica, simetría del flujo, distribución de la magnitud velocidad y presión estática.

**Palabras claves:** modelación numérica, canal a superficie libre, disipador de energía, dinámica de fluidos computacional (CFD).

## Abstract

This paper deals with the modeling of the computational fluid dynamics in permanent flow of the new free surface channel laboratory with a transition structure that functions as an energy dissipator plus a correction ramp of current lines. The Ansys Fluent software was used to model the water-air interface with the volume of fluids model (VOF) and the “Baseline (BSL) k -  $\omega$ ” model for turbulent flow. The results were compared and analyzed with measurements performed on a physical model. Comparative models were analyzed, with energy-dissipator-free and ramp-free topologies, in terms of parameters such as surface water height, mechanical energy, flow symmetry, distribution of magnitude of velocity, and static pressure.

**Keywords:** numerical modeling, free surface channel, energy dissipator, computational fluid dynamics (CFD).

## INTRODUCCIÓN

Los métodos para que un ingeniero pueda diseñar y evaluar cualquier sistema, llámese estructura u obra, en cuanto a la dinámica de fluidos son la experimentación (modelo físico) y el cálculo (modelo matemático) (Cengel & Cimbala, 2006). En la actualidad, los ingenieros en general diseñan estructuras hidráulicas con relaciones empíricas en las que el análisis de resultados es limitado, ya que no se toman en cuenta fenómenos que pueden presentarse en otras dimensiones.

Los modelos matemáticos 2D y 3D pueden proporcionar información sobre lo que ocurrirá en una instalación existente, modificada, o simplemente proponer una serie de situaciones en las que el modelo podría funcionar bien del lado de la confiabilidad (Butler & Davies, 2011).

En el presente artículo se analiza la dinámica de fluidos en flujo permanente en el nuevo canal de laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería (en adelante, ECI N.º 2), usando modelos numéricos 1D con las ecuaciones de Runge Kutta de cuarto orden, 2D y 3D con el *software* de dinámica de fluidos computacional (CFD) Ansys Fluent versión 15 (figura 1). La modelación de esta estructura hidráulica se compone de dos fases: la primera solamente en el canal rectangular y la segunda de manera conjunta con la estructura de disipación de energía que tiene en su interior.

El contenido del presente artículo forma parte del estudio original de Mora Uscátegui (2017).

## OBJETIVOS

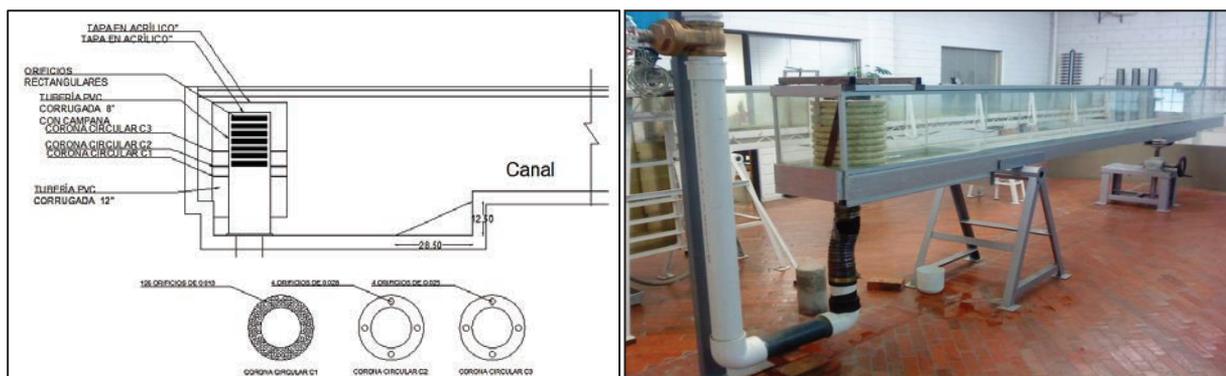
- Modelar la superficie libre de agua en el canal ECI N.º 2.

- Analizar la disipación de energía mecánica en el sistema del canal ECI N.º 2.
- Analizar la simetría del flujo de agua en el sistema del canal ECI N.º 2 con respecto a:
  - Distribución de flujos primarios (U) y secundarios (VW).
  - Distribución del coeficiente de fricción sobre el fondo del canal rectangular.
  - Líneas de corriente de agua modeladas desde la entrada de la tubería de 4".
- Analizar la distribución de la velocidad y presión estática del flujo de agua en el sistema del canal ECI N.º 2.

## MODELO FÍSICO

El canal se diseñó y construyó de modo tal que sea alimentado por una tubería de 4" de diámetro, compuesta por dos materiales. El primero es PVC, que está conectado al tanque elevado del sistema de bombeo, y el segundo es un material de manguera flexible con características tales que ayudan a que la entrega de agua no tenga problema cuando el canal cambie de pendiente con el apoyo escalizable. En su interior contiene una estructura de transición con la función de disipar la energía, el cual descansa en un tanque con medidas de 0,378 m de ancho y 0,96 m de longitud, entregando un flujo de agua calmado con la ayuda de una rampa para corregir las líneas de corriente a un canal rectangular de sección uniforme, con medidas de 0,378 m de ancho y 5,05 m de longitud.

En el estudio original se analizaron cuatro caudales, pero, en el presente artículo se analizó el caudal denominado Q3 igual a 18,21 L/s. Se generó un perfil hidráulico supercrítico con pendiente del 1 %.



**Figura 1.** Canal de laboratorio ECI N.º 2.

Fuente: Rodríguez Cárdenas & Camargo, 2013.

### Modelación 1D

El método que se utilizó para flujo permanente en 1D es el método de cuarto orden de Runge-Kutta, programado en lenguaje Visual Basic de Excel.

### Modelaciones 2D y 3D

Se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo incompresible, permanente, y flujos internos y externos multifase (agua y aire). El *software* Ansys Fluent es una herramienta computacional que resuelve estas ecuaciones, basada en el método de volumen finito. El dominio computacional está discretizado en un conjunto finito de volúmenes de control (celdas). La ecuación general de conservación de la masa (transporte) y cantidad de movimiento se resuelven en este conjunto de volúmenes de control.

Las ecuaciones diferenciales parciales son discretizadas dentro de un sistema de ecuaciones algebraicas. Todas estas ecuaciones algebraicas se resuelven luego numéricamente para interpretarlas en un campo de solución.

Al utilizar un modelo de turbulencia, la ecuación de Navier-Stokes se reemplaza por lo que se llama ecuación de Navier-Stokes de número de Reynolds promedio (NSRP, RANS, por su sigla en inglés), utilizando la hipótesis de Boussinesq para relacionar los esfuerzos de Reynolds a los gradientes de velocidad media. El modelo estándar  $k-\omega$  es un modelo empírico basado en ecuaciones del modelo de transporte de la energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la tasa de disipación específica ( $\omega$ ), que también puede considerarse como la relación de  $k$  y  $\epsilon$  (tasa de disipación de la energía cinética turbulenta por unidad de masa). El modelo *Baseline* (BSL)  $k-\omega$  fue desarrollado por Menter para mezclar el modelo  $k-\omega$  en la zona cercana a la pared, con la independencia de la corriente libre del modelo  $k-\epsilon$  en la zona lejana a la pared, utilizado en el presente estudio.

Para modelar la superficie libre se usó el modelo de volumen de fluido VOF, que puede modelar dos o más fluidos inmiscibles por la solución de un único conjunto de ecuaciones de cantidad de movimiento y el seguimiento de la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio. Para el presente estudio se emplearon los fluidos de agua y aire.

Los métodos de discretización utilizados se presentan a continuación (tabla 1):

**Tabla 1**  
Métodos de discretización

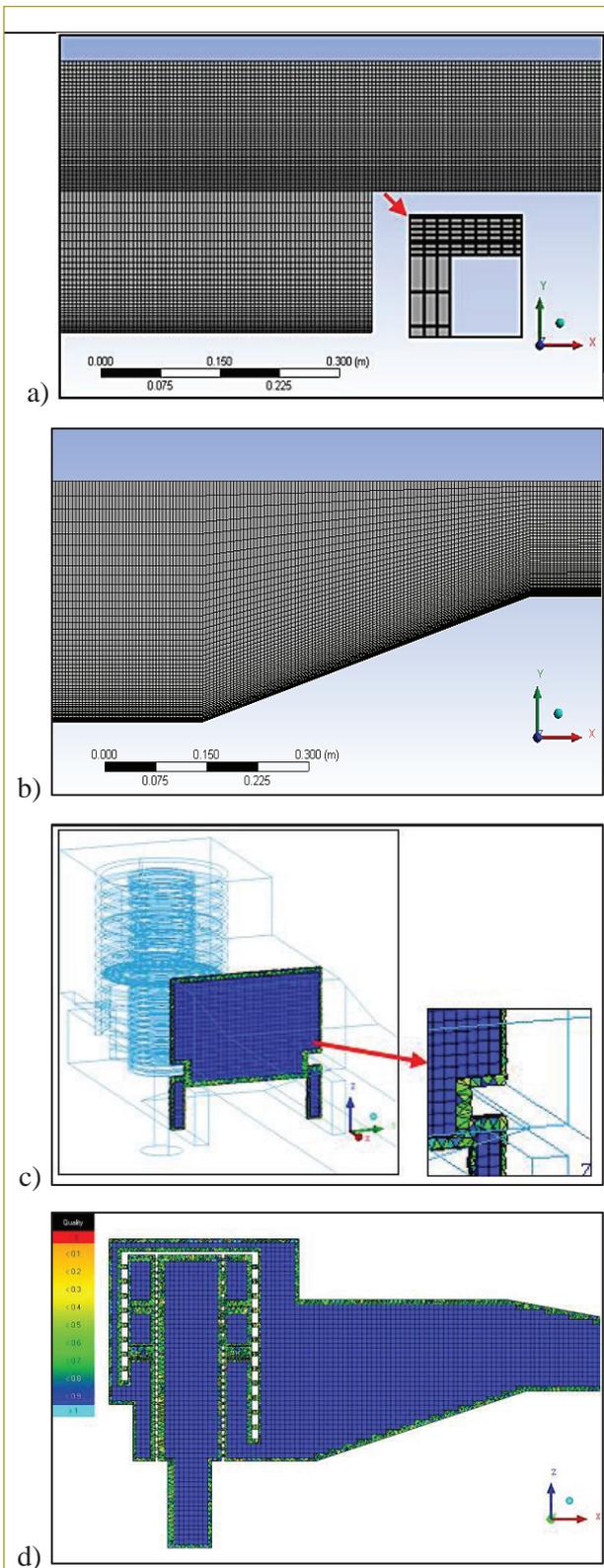
Acoplamiento de la presión - velocidad	
Esquema	Simple
Discretización espacial	Método
Gradientes	<i>Least squares cell based</i>
Presión	<i>Body force weighted</i>
Cantidad de movimiento	<i>First order upwind</i>
Fracción de volumen	<i>Modified HRIC</i>
Energía cinética turbulenta	<i>First order upwind</i>
Tasa de disipación específica	<i>First order upwind</i>

Para el proceso de cálculo se utilizó un computador personal con procesador Intel® Core™ i7 - 4700HQ CPU @ 2.40 GHz - 2.39 GHz, 4 núcleos y 8 procesadores lógicos, 16 GB de memoria RAM y tarjeta gráfica Nvidia Geforce GTX 760M.

Para diseñar y crear la malla del dominio en 2D y 3D se usaron las herramientas de la plataforma de Ansys, como los generadores de malla Mesh-Workbench para 2D y ICEM CFD para 3D.

Para dominios 2D se utilizó mallado estructurado con celdas cuadradas. Para dominios 3D se empleó el mallado tipo híbrido, con el método Delaunay con celdas tetraedro en los límites y hexagonal en el núcleo del dominio. El mallado para 3D se escogió por la complejidad de la geometría en la región del disipador de energía y alrededores al tener espacios y regiones de gran variabilidad. En el diseño de la malla se tuvo en cuenta la altura de la primera celda que comprenda un  $y+$  entre 1 - 10 para regiones con recirculación con gradientes de presión y velocidad, como también  $y+$  entre 30 y 500 para regiones donde el flujo turbulento esté en desarrollo.

Se analizaron cuatro topologías. Las dos primeras son teóricas en 1D y 2D, llamadas canal con entrada larga sin rampa "T0a" y canal con entrada larga con rampa "T0b". Las otras dos son en 3D, llamadas canal sin disipador de energía y sin rampa "T1" y canal con disipador de energía y con rampa "T3". En el estudio original existe una topología llamada canal con disipador de energía y sin rampa "T2", pero no se analiza en el presente artículo, aunque se dejan algunos resultados como referencia. Para T0a se utilizaron 125.784 celdas, con un costo computacional de 3,7 horas y 60.000 iteraciones; para T0b se usaron 104.800 celdas, con un



**Figura 2.** Malla estructurada utilizada para modelaciones en 2D (a, b) y malla híbrida usada para modelaciones en 3D (c, d).

costo computacional de 2,5 horas y 60.000 iteraciones; para T1 se emplearon 1.341.579 celdas, con un costo computacional de 10 horas y 4350 iteraciones; para T3 se usaron 1.656.580 celdas, con un costo computacional de 10,23 horas y 7000 iteraciones.

Como criterio de verificación, en las modelaciones en 2D y 3D se monitorearon los residuales de las ecuaciones de continuidad, componentes de velocidad ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), energía cinética turbulenta ( $k$ ), tasa de disipación de energía específica ( $\omega$ ) y la fracción de volumen (VOF), hasta donde los cambios en las variables de la solución de una iteración a la siguiente son insignificantes, con un criterio de convergencia en un rango de  $1 \times 10^{-3}$  a  $1 \times 10^{-5}$ .

Se monitoreó el caudal másico de la fase agua en la salida de agua, hasta alcanzar valores constantes en cada iteración y cercanos al valor inyectado. También se monitoreó la presión estática en las superficies localizadas, hasta alcanzar valores constantes en cada iteración y cercanos al valor medido.

Se estableció un intervalo de confianza del 4 % como criterio de validación y para medir la incertidumbre de los resultados de mediciones versus modelaciones del caudal volumétrico, presión estática y altura de lámina de agua. También se establecieron secciones de control para realizar análisis de resultados (figura 3).

### Condiciones de frontera utilizadas

Para modelar VOF en un canal abierto se utilizaron las siguientes condiciones de frontera (*boundary conditions*, BC). *Wall* (pared): Se asigna una condición de no deslizamiento (*no slip*), todos los flujos perpendiculares a la pared son igual a cero. Para flujo turbulento se especifica la altura de rugosidad de 0,008 para materiales lisos (vidrio, PVC, aluminio) y una constante que por defecto es 0,5 para rugosidades uniformes, según las modificaciones de Cebeci y Bradshaw (Ansys, Inc., 2013) a la ley de la pared. *Mass flow inlet* (flujo másico a la entrada): Se especifica el flujo másico de la fase agua y aire, intensidad turbulenta, diámetro hidráulico. *Pressure inlet* (presión a la entrada): Se especifican velocidad absoluta, intensidad turbulenta, diámetro hidráulico. *Velocity inlet* (velocidad a la entrada): se especifican velocidad absoluta, diámetro hidráulico y método de interpolación de la densidad. *Pressure outlet* (presión a la salida): Presión manométrica igual a cero (0), simulando presión atmosférica a la salida y en la

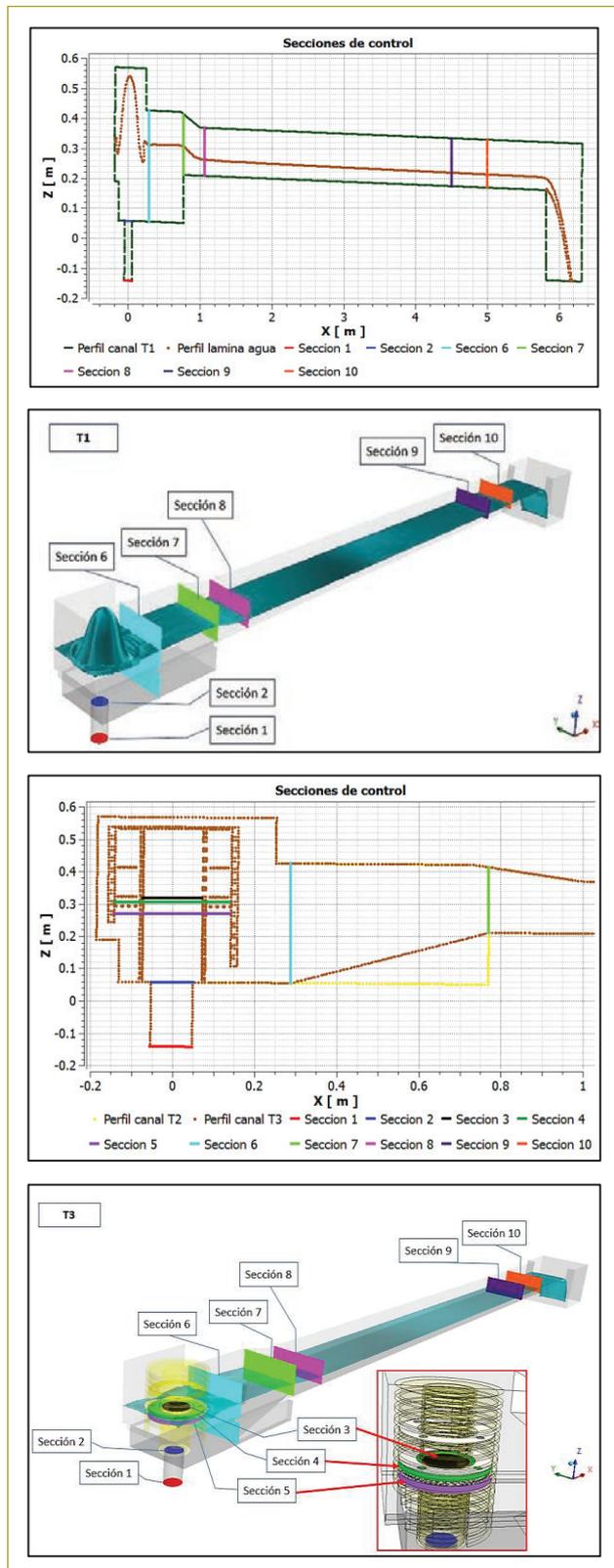


Figura 3. Ubicación de las secciones de control para el análisis de escenarios con topologías T1 y T2 en 3D.

parte superior del dominio (canal), simulando que el aire corre libremente.

## RESULTADOS

### Perfil de lámina de agua medido versus modelado

Al superponer el perfil de la lámina de agua medida con la modelada con Ansys Fluent 3D, se puede analizar la capacidad de representar el nivel de agua en diferentes regiones del dominio, para así tener un criterio de aceptabilidad. El perfil de la lámina de agua modelado se ajusta al medido, encontrando una singularidad en la región del dissipador de energía, donde se observa que el flujo se encuentra presurizado y el modelo no dibuja una interfaz agua-aire (figura 5).

En cuanto a las modelaciones comparativas de los modelos ideales con entrada larga con respecto a los dominios con dissipador de energía reales y sin él (figura 6), las modelaciones en 1D y 2D fueron importantes al tener en cuenta solo flujo uniforme con perfiles ideales para secciones transversales semejantes. Estos modelos fueron claves para modelar un canal rectangular lo suficientemente largo, con condiciones tranquilas, y tener en cuenta singularidades como el desplazamiento de la altura crítica “yc” a la sección inicial del canal rectangular y compararlo con las modelaciones del perfil de lámina de agua en 3D. Los modelos arrojaron el mismo desplazamiento en las diferentes topologías, obteniendo mejores resultados con la topología con dissipador de energía y rampa al encontrar que la ubicación de “yc” está más cerca de la entrada del canal rectangular, con un perfil de lámina de agua con leves perturbaciones.

Según la bibliografía existente, en la altura crítica la energía específica y la fuerza específica son mínimas y el caudal unitario es máximo, pero como se observa, puede sufrir un desplazamiento en dirección al flujo.

### Energía mecánica

En el presente aparte se analizó la variación de estos parámetros entre secciones de cada topología y caudal, teniendo en cuenta la ecuación  $h = h_{EP} + (\bar{h}_{EC} + h_K) + h_f$ , donde  $h$ : energía mecánica total o cabeza total,  $h_{EP}$ : cabeza potencial o piezométrica,  $\bar{h}_{EC}$ : cabeza de energía cinética promedio,  $h_K$ : cabeza de energía cinética turbulenta,  $h_f$ : pérdida por fricción (esfuerzos cortantes).

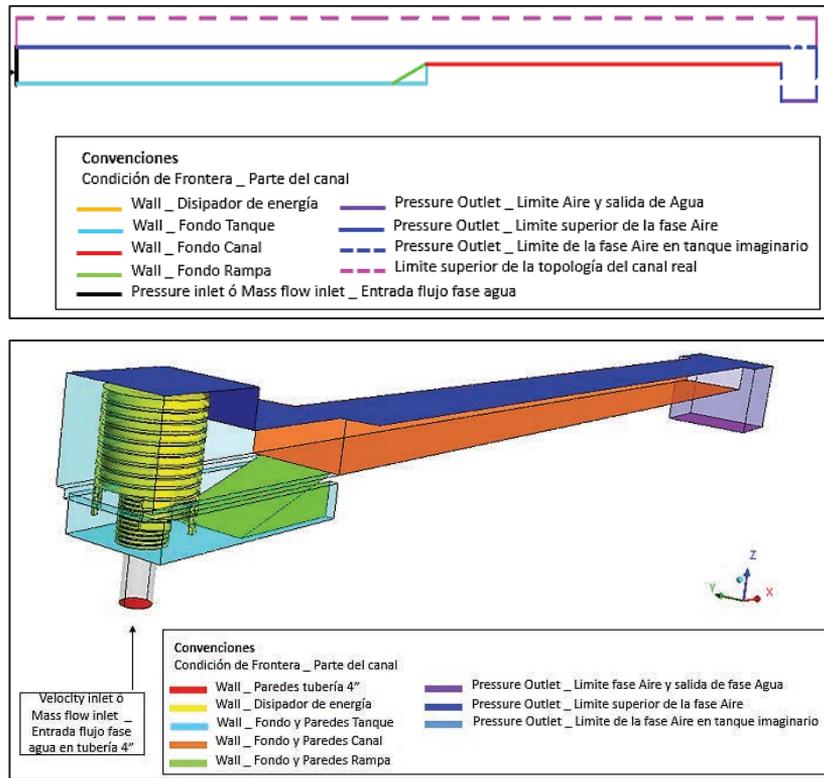


Figura 4. Condiciones de frontera para modelos 2D y 3D para el canal ECI N.º 2.

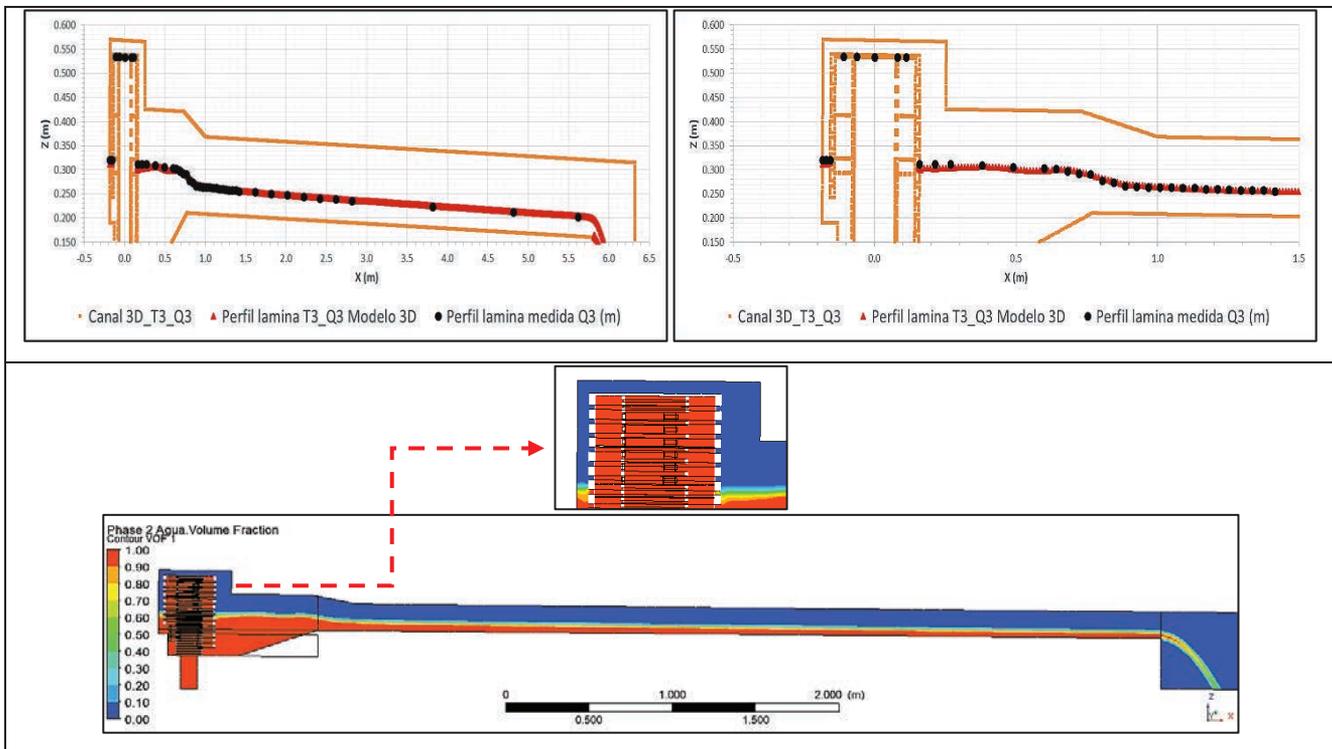


Figura 5. Perfil de lámina de agua medido vs. 3D, T3\_3D\_Q3 (en el eje central).

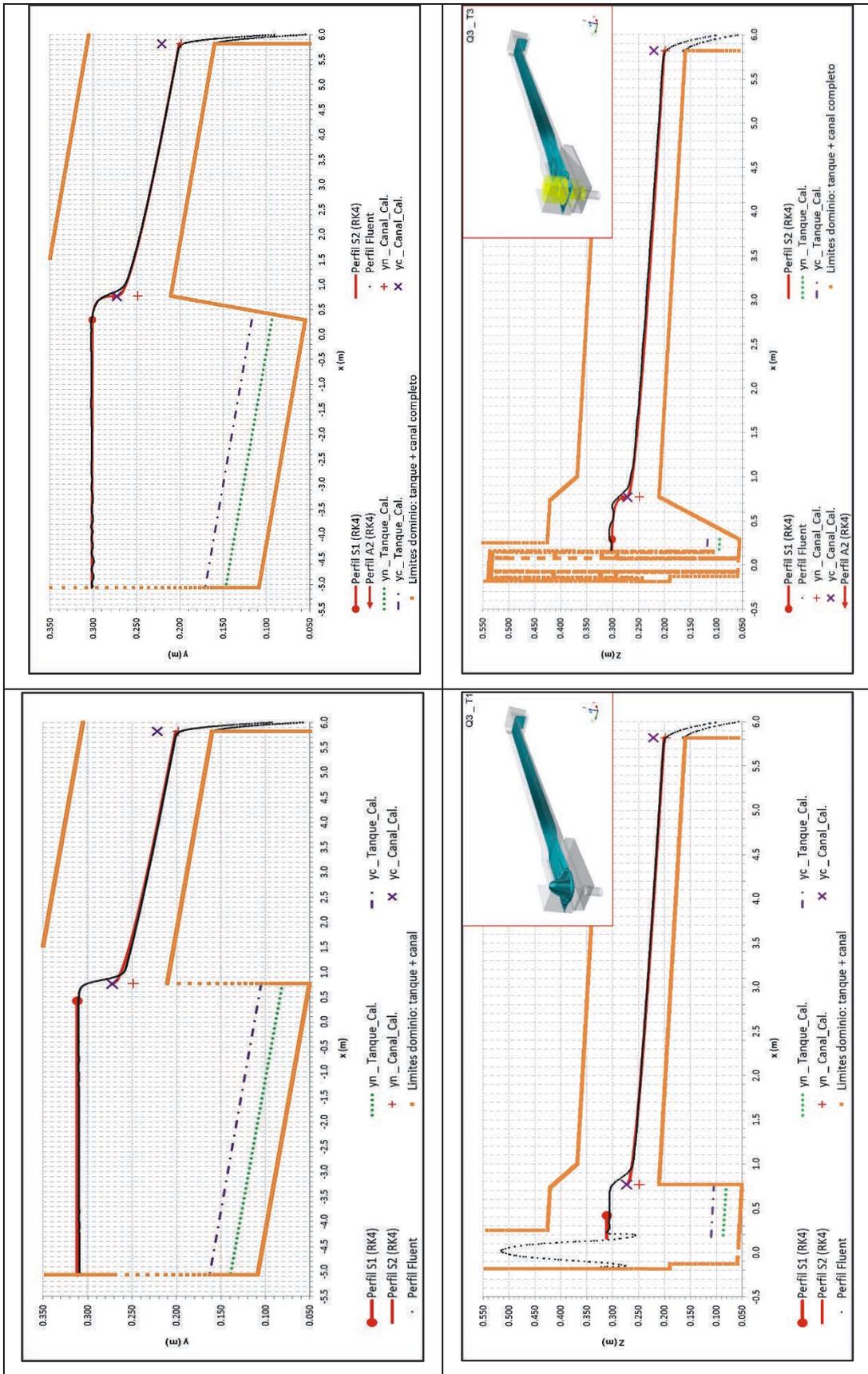
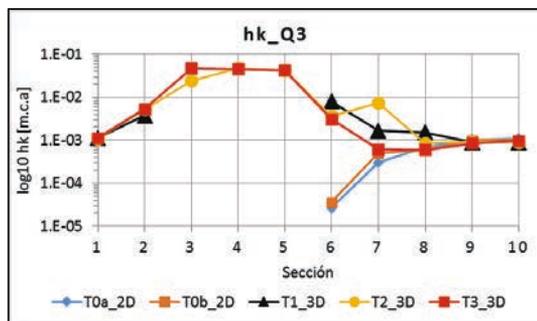
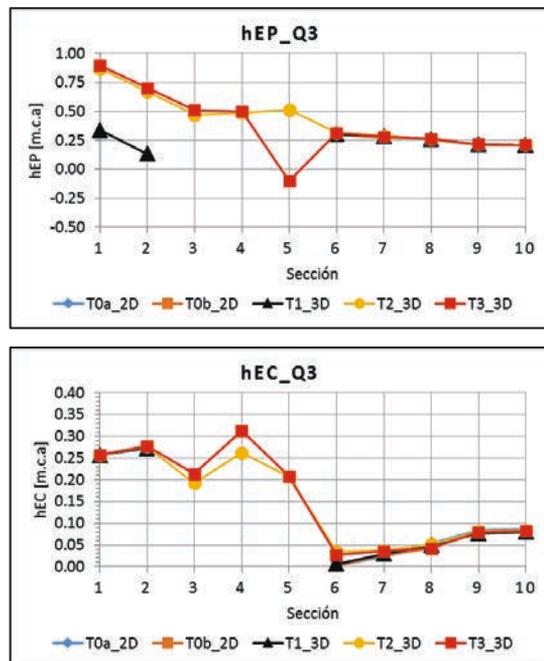


Figura 6. Perfiles de lámina de agua para T0a\_1D\_Q3 vs. T0a\_2D\_Q3 y T0b\_1D\_Q3 y T0b\_2D\_Q3 (arriba), (VOF=0,5). Perfiles de lámina de agua para T1\_3D\_Q3 y T3\_3D\_Q3 (abajo), (VOF=0,5).

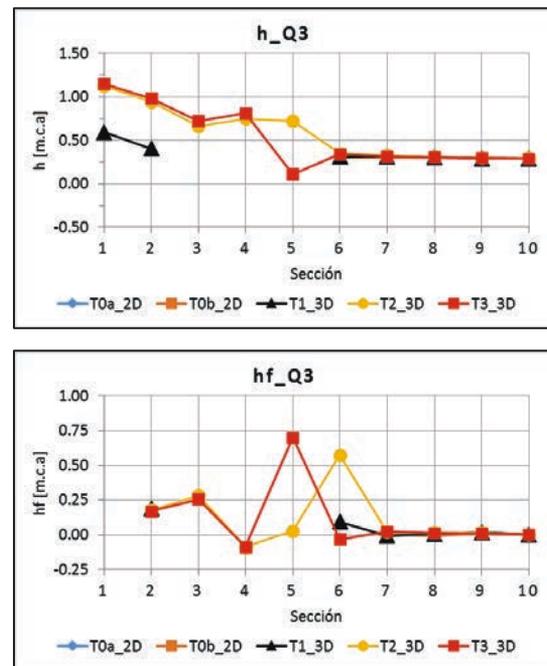
En cuanto a las modelaciones comparativas sobre la energía mecánica, el parámetro de energía cinética turbulenta fue importante para cuantificar la disminución del flujo caótico observado por Rodríguez Cárdenas & Camargo (2013) al implementar el dissipador de energía y la rampa antes del canal rectangular. Parámetros como cabeza de energía potencial, cabeza de energía cinética promedio y cabeza de energía total no reflejaron el fenómeno, entendiendo que el flujo, al pasar por las topologías sin dissipador de energía y sin rampa, también se encuentra disipando energía pero con menor eficiencia (figuras 7 a 9).



**Figura 7.** Valores de la cabeza de energía cinética turbulenta  $h_k$  (m.c.a.). T#: Topología.



**Figura 8.** Valores de la cabeza de energía potencial  $h_{EP}$  (m.c.a.) y la cabeza de energía cinética promedio  $h_{EC}$  (m.c.a.). T#: Topología.



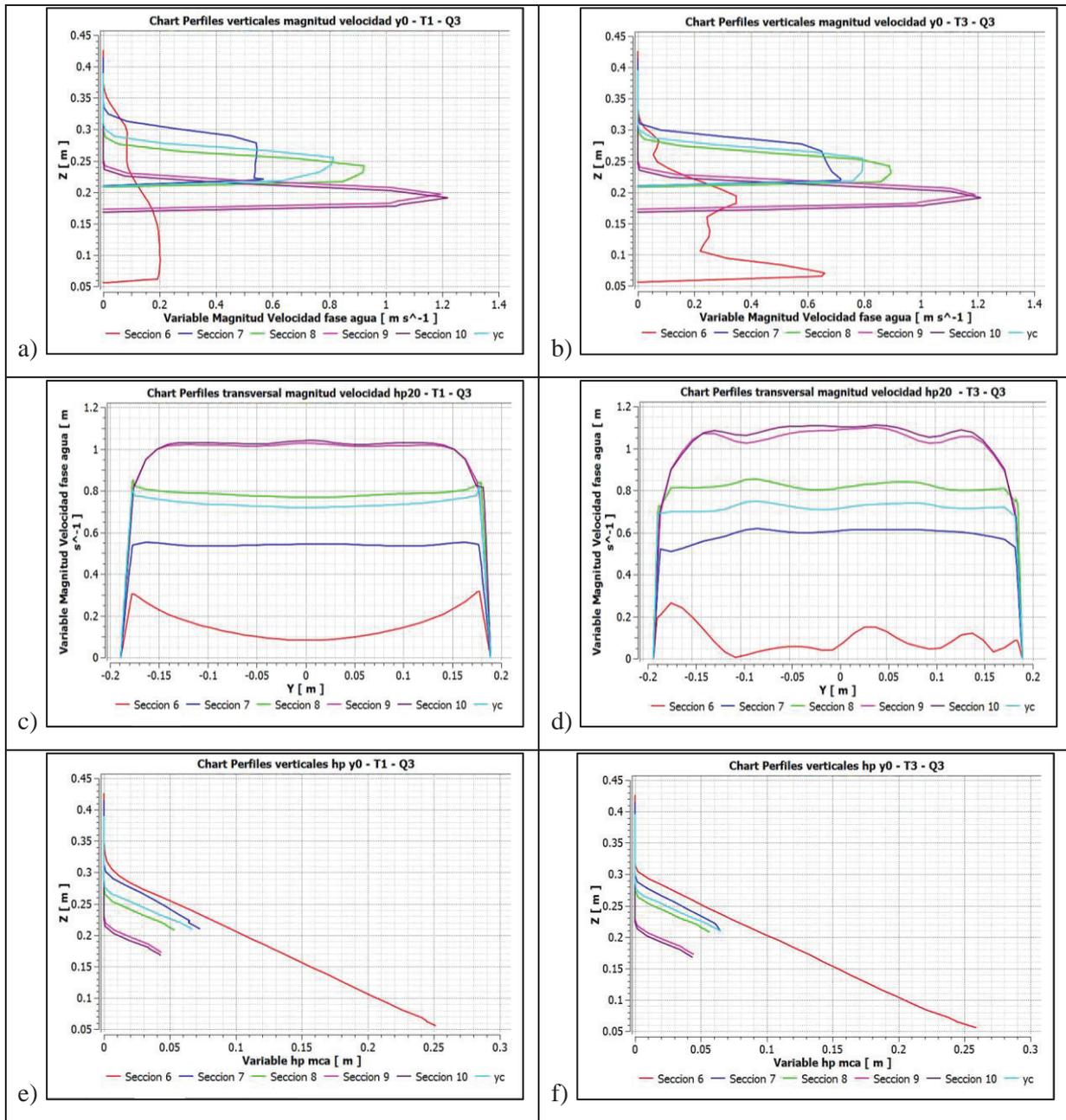
**Figura 9.** Valores de la cabeza energía total  $h$  (m.c.a.) y la pérdida por fricción  $h_f$  (m.c.a.). T#: Topología.

### Simetría del flujo

Los resultados de la modelación de la distribución de flujos primarios y secundarios para las topologías T1 y T3 arrojaron que la decisión de modelar el dominio completamente desde un principio fue acertada, ya que la simetría del flujo varía de acuerdo con la topología y la sección en la que se analizó, y según el caudal inyectado.

A su vez, los resultados de la modelación de la distribución del coeficiente de fricción ( $C_f$ ) en el fondo del canal para todas las topologías, desde la sección 8 hasta la 10 evidencian que el flujo es eje-simétrico, asumiendo que las variaciones son pequeñas, a diferencia del análisis de distribución de flujos primarios y secundarios; además, se encontró que la distribución del coeficiente de fricción local está fuertemente relacionada con la distribución de flujos primarios y secundarios en cercanías del fondo del canal.

Desde el análisis de la distribución de las líneas de corriente para la topología T1, el flujo es eje-simétrico; sin embargo, para T3 el flujo no es eje-simétrico, puesto que tiene más concordancia con el análisis de distribución de flujos primarios y secundarios que con el análisis del coeficiente de fricción local (figuras 11 a 17).



**Figura 10.** Distribución de la magnitud velocidad vertical, en las secciones de las topologías T1 (a) y T3 (b). Distribución de la magnitud de velocidad transversal, en las secciones de las topologías T1 (c) y T3 (d). Distribución de la presión estática (hp), en las secciones de las topologías T1 (e) y T3 (f).

**Nota:**  $hp_{20}$  = medido a 20 % de la presión estática de la sección, es decir, medido a 0,2 de la altura de la lámina de agua desde la superficie libre.  $Z$  = eje vertical del dominio en 3D.  $y_0$  = eje central del canal en 3D.

### Perfiles de velocidad

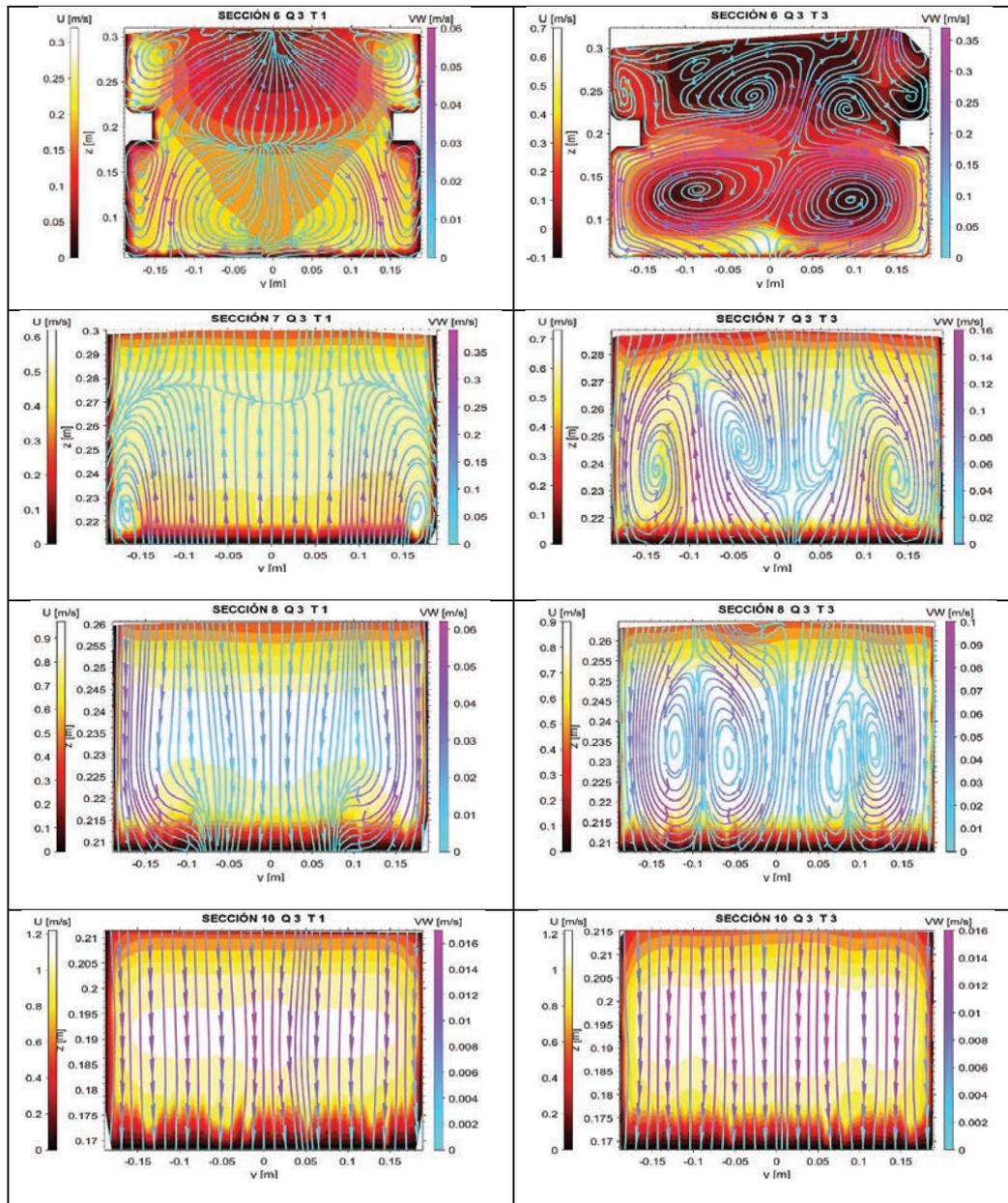
Según las comparaciones del perfil de velocidad vertical en la región de la sección 6 ubicada en el tanque y la región de la sección 7 ubicada al inicio del canal rectangular de las topologías T1 y T3 para todos los caudales, se observó un perfil diferente del logarítmico, lo que

representa que la teoría de la capa límite no es válida, es decir, que las ecuaciones de RANS fueron calculadas completamente y el modelo Ansys Fluent no utilizó la ecuación de la ley logarítmica de velocidad. Lo contrario se observó en las secciones 8, 9 y 10, ubicadas en el canal rectangular, encontrando un perfil de velocidad

vertical logarítmico, lo que representa que la teoría de la capa límite es válida, esto es, que las ecuaciones de RANS fueron calculadas y el modelo utilizó la ecuación de la ley logarítmica.

En relación con la distribución de los perfiles transversales de la magnitud velocidad, las secciones transversales 6, 7, “yc” y 8 de la topología T1 (sin dissipador de energía y rampa) presentan perfiles definidos, con regiones con aceleración y desaceleración del flujo en cercanías del inicio del canal. Caso contrario pasa en la

topología T3, donde se aprecia que el perfil tiene una leve deformación con picos máximos. Para las secciones transversales 9 y 10 en las topologías T1 y T3, el perfil de velocidad transversal indica que hay una leve deformación, con picos máximos. La variabilidad de picos máximos señala que el flujo no es simétrico y, por ende, no se puede realizar un análisis de perfiles de velocidad vertical con ecuaciones teóricas, como la ley logarítmica o la raíz séptima de Prandtl, adaptadas para flujo externos (figura 10 a, b, c y d).

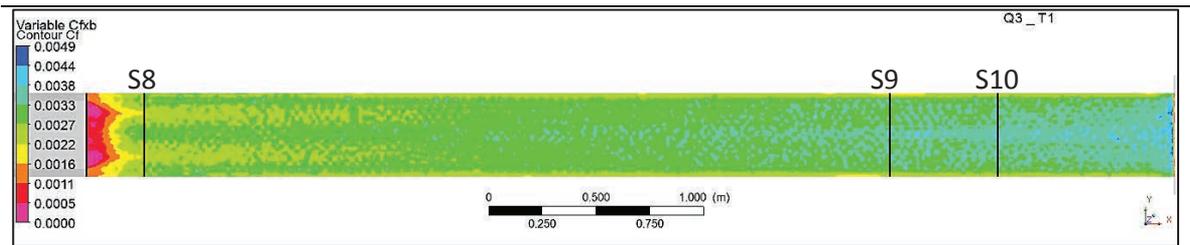


**Figura 11.** Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en las secciones 6, 7, 8 y 10 de la topología 1 (izquierda) y de la topología 3 (derecha) para el caudal Q3.

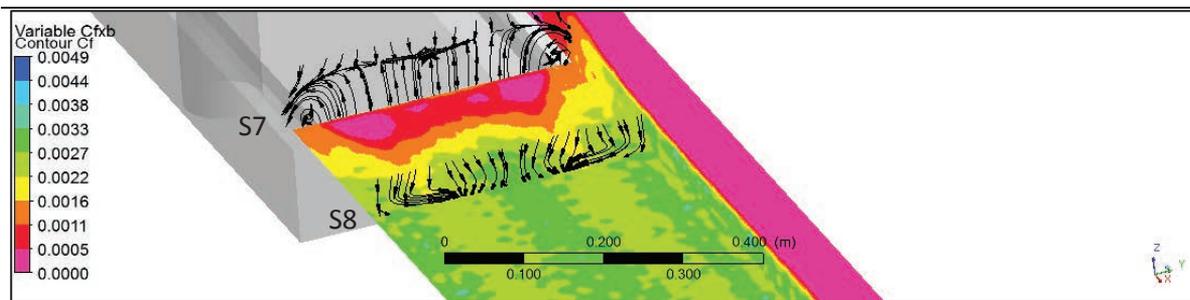
### Perfiles de la presión estática

En la distribución de los perfiles de la presión estática para las secciones verticales 6, 8, 9 y 10, en las topologías T1 y T3, las líneas forman un ángulo de 45°, considerándose desde la base de la teoría como hidroestáticas, con la presencia de un leve quiebre en la parte inferior. Pero para la sección vertical 7 en T1 se observa una

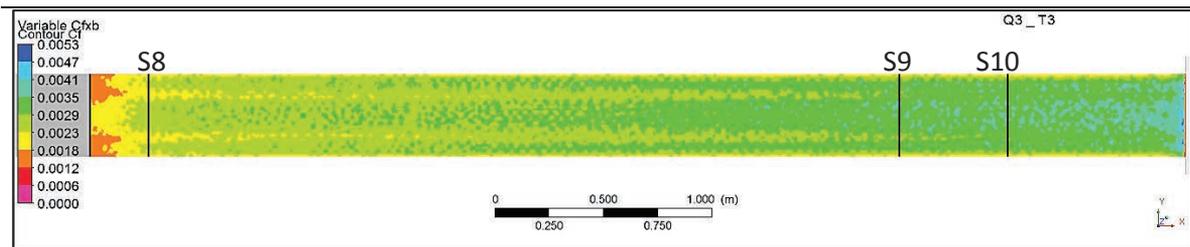
curvatura con un quiebre más definido en la parte inferior; sin embargo, en la misma sección para T3 esta curvatura desaparece, pero con un quiebre menor que el de T1, encontrando una razón de cómo la rampa ayuda a que el perfil sea más hidroestático desde la sección 7 (figura 10 e y f).



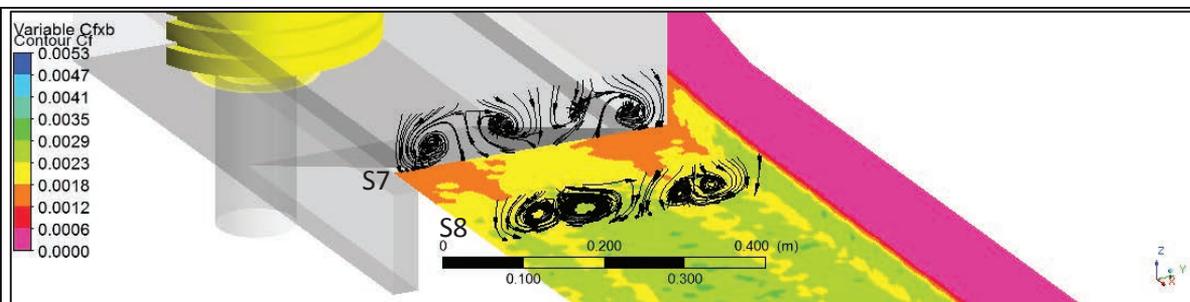
**Figura 12.** Distribución del coeficiente de fricción por ancho de canal de la topología 1 para los caudales Q3 (vista de planta).



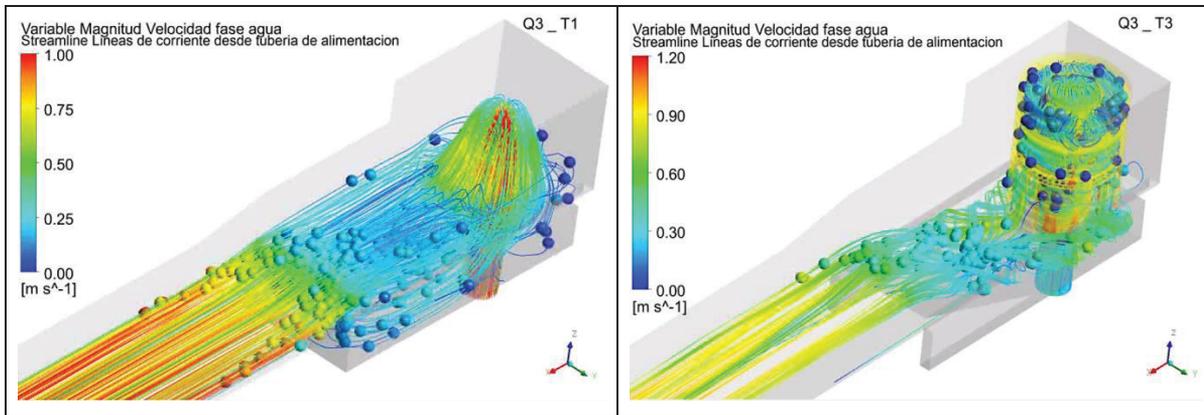
**Figura 13.** Influencia de los flujos secundarios en la distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, en las secciones 7 y 8 de la topología 1, para el caudal Q3.



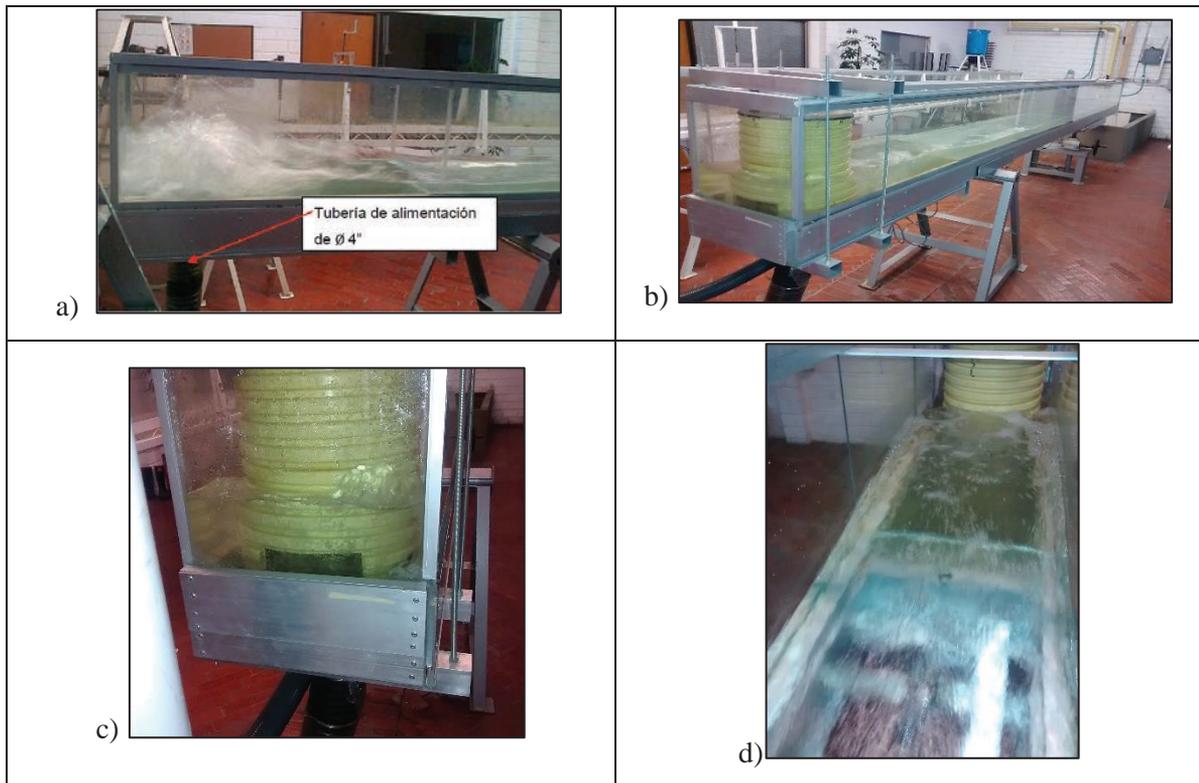
**Figura 14.** Distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, de la topología 3 para los caudales Q3 (vista de planta).



**Figura 15.** Influencia de los flujos secundarios en la distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, en las secciones 7 y 8 de la topología 3, para el caudal Q3.



**Figura 16.** Distribución de líneas de corriente y trazas de partículas de agua modelado desde la tubería de alimentación, de las topologías T1 (izquierda) y T3 (derecha), para el caudal Q3.



**Figura 17.** Condiciones iniciales (a) para T1 y finales (b, c, d) para T3 y Q3 a la entrada del canal.

**Fuente:** Adaptado de Rodríguez Cárdenas & Camargo, 2013, (a) y este estudio (b, c, d).

Se recomienda para trabajos futuros, desde el punto de vista computacional para modelaciones en 2D y 3D, utilizar un clúster o red de procesadores para realizar procesos de cálculo con mayor rapidez que el utilizado en este estudio y hacer las posibles correcciones que se presenten, como el análisis de la dependencia de la malla, reduciendo la incertidumbre de lo calculado o modelado y lo medido. Desde lo instrumental, se aconseja instalar

transductores para el canal ECI N.º 2, y un sensor de ultrasonido o un sistema de fotointerpretación de nivel de agua como testigo en regiones donde se presuma que el perfil no es hidroestático. También es necesario, para calibraciones de los modelos de turbulencia, utilizar medidores de turbulencia en canales abiertos enlistados por Nezu (2005), como el medidor de corriente ultrasónica, el medidor de corriente electromagnético (EM), el

anemómetro de película caliente (HFA), el velocímetro Doppler acústico (ADV), el anemómetro laser Doppler o el velocímetro LDA o LDV.

## CONCLUSIONES

- Mediante las modelaciones de CFD con el *software* Ansys Fluent, a través de la verificación del código y la validación con mediciones en el modelo físico del canal ECI N.º 2, se logró representar la superficie libre de agua en flujo permanente y realizar análisis complementarios, pese a los errores que se pudieron tener, tanto humanos como del instrumental en las mediciones y la calidad de la malla, como los modelos elegidos para las modelaciones.
- Según los modelos en 1D, 2D y 3D, se encontró que la altura crítica sufre un desplazamiento en dirección del flujo según el tipo de entrada al canal rectangular con sección uniforme, observando que para una entrada con escalón de 90° el desplazamiento es mayor y para una entrada en forma de rampa de 18,43° el desplazamiento es menor, mejorando notablemente con el disipador de energía.
- En cuanto a los resultados de las modelaciones de la energía mecánica total y sus componentes, se encontró que la topología T1 disipa energía al encontrarse el chorro de agua ascendente con una masa de agua embalsada y luego con la presión atmosférica, donde cae libremente para seguir la dirección normal de la corriente, pero con un flujo caótico. Al incluir la estructura de transición de disipación de energía y la rampa, la entrega del flujo al canal de sección uniforme mejora considerablemente, hallando que la energía cinética turbulenta es la responsable de tal condición caótica inicial, disminuyendo su magnitud desde la sección 6 hasta la 9, donde el flujo se torna uniforme.
- Las modelaciones en 3D sirvieron para realizar análisis de simetría del flujo. Este tema es importante en la decisión de modelar en 3D un dominio completo o solo con la mitad de éste, utilizando la condición de frontera “Symmetry” en Ansys Fluent, como herramienta de optimización de tiempo computacional. Además, se demostró que el flujo se encuentra sufriendo una inclinación hacia la margen derecha del canal al incluir el disipador de energía, dejando la puerta abierta a futuras investigaciones en cuanto a la optimización de la estructura de transición.
- De acuerdo con la distribución de la magnitud velocidad vertical y transversal, Ansys Fluent no sólo utiliza la ley logarítmica para el cálculo de perfil de velocidades, sino que también calcula completamente las ecuaciones de RANS en regiones en las que existen recirculaciones con aceleraciones y desaceleraciones, donde la teoría de la capa límite no es válida. Con respecto a la distribución de la presión estática, las secciones de T3 presentan perfiles hidroestáticos más definidos que en T1, atribuyendo esta mejora a la presencia del disipador de energía y rampa.
- Según los resultados arrojados por los modelos en 1D, 2D y 3D, el canal con disipador de energía y rampa disminuye espacio y recursos en las instalaciones del laboratorio de hidráulica, al comparar la geometría de la topología ideal modelada en 1D y 2D con la modelada en 3D.

## REFERENCIAS

- Nezu, I. (2005). Open-Channel Flow Turbulence and Its Research Prospect in the 21st Century. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 19.
- Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Van Wachem, B. (2012). *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Nueva York: Cambridge University Press.
- Ansys, Inc. (2013). Ansys help 16.0, Fluent. Canonsburg, Pennsylvania, Estados Unidos.
- Bakker, A. (2012). *The Colorful Fluid Mixing Gallery*. Obtenido de Course Materials for the Computational Fluid Dynamics (ENGS 150), Dartmouth College from 2002-2006: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>.
- Butler, D., & Davies, W. J. (2011). *Urban drainage*. Abingdon: Taylor & Francis Group.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de fluidos, Fundamentos y aplicaciones*. México, D.F.: McGraw-Hill/ Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos* (Juan Saldañriaga, Trad.). Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Gautam, B., & Vinayak, E. (2002). *Turbulent Flows: Fundamentals, Experiments and Modeling*. Kanpur, India: Alpha Science International Ltd.
- Mora Uscátegui, J. A. (2017). *Modelación hidrodinámica bi- y tridimensional de dos canales con disipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería, utilizando Ansys Fluent*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, maestría en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.
- Rodríguez Cárdenas, H. S., & Camargo, S. A. (2013). *Diseño y construcción de un dispositivo de disipación de energía a la entrada del canal experimental de pendiente variable de la ECI*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method*. Harlow: Pearson Education Limited.



# Lineamientos de seguridad vial para la prevención de la accidentalidad vial en los corredores del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP). Caso de estudio: corredor de la avenida calle 72

Road safety guidelines to prevent accidentality in the Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) corridors. Case study: Avenida calle 72 corridor

CARLOS EDUARDO PUENTES GARCÍA<sup>1</sup> - MARITZA CECILIA VILLAMIZAR ROPERO<sup>2</sup>

1. Maestría en Ingeniería Civil.
2. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

carlos.puentes-g@escuelaing.edu.co - maritza.villamizar@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/10/2017 Aceptado: 28/11/2017

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

## Resumen

En Colombia, los accidentes de tránsito son la segunda causa de muertes violentas. Por eso, el objetivo de la presente investigación es plantear lineamientos para la prevención de la accidentalidad vial y encontrar sus causas en los corredores del SITP. El sistema cuenta con cerca de 6500 vehículos (sin incluir información del SITP provisional) y diez zonas asignadas, pero en este trabajo sólo se estudió la accidentalidad vial de los vehículos asociados al SITP, tomando como base los cinco pilares del Plan Nacional de Seguridad Vial. Para ello se realizaron mapas de calor de los accidentes de tránsito correspondientes a los vehículos asociados a la zona de Engativá desde el año 2012 hasta junio del año 2017, lo que permitió determinar las zonas de mayor accidentalidad y las distancias desde hasta el evento al paradero más cercano.

De las áreas de mayor accidentalidad se seleccionaron registros para el análisis basado en la matriz de Haddon, y posteriormente se hicieron el análisis, procesamiento de datos y generación del informe final. Una vez procesados y depurados los datos se cargaron a TransCAD, se crearon mapas de calor asociando eventos al arco más cercano de la red de transporte y luego se generó un mapa de densidad. Con el

propósito de corroborar la tendencia de la información, se crearon mapas por año que evidenciaron el comportamiento de la accidentalidad y posibles zonas de riesgo.

Del anterior procesamiento surgieron siete sectores de riesgo, de los cuales se seleccionó el sector 4 con 366 eventos ubicado en la avenida calle 72, entre avenida Ciudad de Cali (carrera 86) y avenida Boyacá (carrera 72).

Del cálculo de la muestra teórica se tiene:  $N=368$ . El sector que más se ajusta es el número 4, con 366 eventos.

Como hipótesis nula se plantea que más del 50 % de los eventos de accidentalidad se producen a una distancia inferior o igual a 40 metros del paradero, debido a infraestructura deficiente en paraderos; como hipótesis alternativa se plantea que menos del 50 % de los eventos de accidentalidad se generan a una distancia inferior o igual a 40 metros del paradero debido a infraestructura deficiente en paraderos, obteniendo valor crítico:  $Z_c = -1,64$  y valor prueba:  $Z_p = 2,30$ ; se rechaza hipótesis alternativa y se acepta hipótesis nula.

De lo anterior se plantean lineamientos de seguridad vial para la prevención de la accidentalidad en los corredores del SITP.

## Abstract

In Colombia traffic accidents are the second cause of violent deaths. The objective of the present investigation is to propose guidelines to prevent road accidents and to find their causes on the SITP corridors. The system has about 6,500 vehicles (not including information from Provisional SITP) and 10 assigned areas. This paper was limited only to road accidents of vehicles associated with this system based on the 5 pillars of the National Road Safety Plan. Traffic accidents heat maps corresponding to the vehicles associated with the Engativá area were carried out from 2012 to June 2017, allowing to identify the areas with the highest accident rates and longest distances from the event to the closest stop.

Data from the most accident-prone areas were selected for analysis based on the Haddon matrix. The analysis, data processing, and final report generation were then performed. Once processed and debugged, the data were loaded to TransCAD; heat maps were created by associating events to the closest arc of the transport network and a density map was subsequently generated. In order to corroborate the trend of the information, maps per year were created that showed the behavior of the accident and possible risk areas.

Of the previous processing, there are 7 risk sectors, of which sector 4 is selected with 366 events located at Av. Calle 72 between Av. Ciudad de Cali (Carrera 86) and Av. Boyacá (Carrera 72).

From the calculation of the theoretical sample we have:  $N = 368$ , the sector that best fits is number 4 with 366 events.

As a null hypothesis it is argued that more than 50% of the accident events are generated at a distance less than or equal to 40 meters from the stops due to infrastructure deficiencies and as an alternative hypothesis it is stated that less than 50% of accident events are generated at a distance less than or equal to 40 meters from the stops due to poor infrastructure, obtaining Critical value:  $Z_c = -1.64$  and Test value:  $Z_p = 2.30$ , alternative hypothesis is rejected and null hypothesis is accepted. Consequently, road safety guidelines are proposed for the prevention of road accidents on the SITP corridors.

## GLOSARIO

**ANSV:** Agencia Nacional de Seguridad Vial.

**EDT:** Estructura de desglose del trabajo.

**Indicador:** Medidas cualitativas o cuantitativas de registro que tienen por objetivo hacer seguimiento principalmente a estrategias planteadas por una organización y comprobar su eficacia y efectividad; deben ser medibles, sencillas y de fácil seguimiento.

**PESV:** Plan Estratégico de Seguridad Vial.

Es el instrumento de planificación que, oficialmente consignado en un documento, contiene las acciones, mecanismos, estrategias y medidas que deberán adoptar las diferentes entidades, organizaciones o empresas de los sectores público y privado existentes en Colombia, encaminadas a alcanzar la seguridad vial como algo inherente al ser humano y así evitar o reducir la accidentalidad vial de los integrantes de sus compañías,

empresas u organizaciones, y disminuir los efectos que puedan generar los accidentes de tránsito (Decreto 2851 de 2013).

**PMBOK:** Project Management Body of Knowledge.

**PNSV:** Plan Nacional de Seguridad Vial.

Plan basado en el diagnóstico de la accidentalidad y del funcionamiento de los sistemas de seguridad vial del país. Determinará objetivos, acciones y calendarios, de modo que concluyan en una acción multisectorial encaminada a reducir el número de víctimas por siniestros de tránsito. La Agencia Nacional de Seguridad Vial (ANSV) será el órgano responsable del proceso de elaboración, planificación, coordinación y seguimiento de este plan, que seguirá vigente hasta que se apruebe la ley y se promulgue un nuevo Plan Nacional de Seguridad Vial (Ley 1702 de 2013).

**SITP:** Sistema Integrado de Transporte Público.

**Seguridad vial:** Entiéndase por seguridad vial el conjunto de acciones y políticas dirigidas a prevenir, controlar y disminuir el riesgo de muerte o de lesión de las personas en sus desplazamientos, ya sea en medios motorizados o no motorizados. Se trata de un enfoque multidisciplinario sobre medidas que intervienen en todos los factores que contribuyen a los accidentes de tráfico en la vía, desde el diseño de la vía y equipamiento vial, el mantenimiento de las infraestructuras viales, la regulación del tráfico, el diseño de vehículos y los elementos de protección activa y pasiva, la inspección vehicular, la formación de conductores y los reglamentos de conductores, la educación e información de los usuarios de las vías, la supervisión policial y las sanciones, la gestión institucional, hasta la atención a las víctimas (Ley 1702 de 2013).

**TMSA:** Transmilenio S.A.

## INTRODUCCIÓN

Las cifras de accidentalidad del SITP llegaron a valores de 4602 en el año 2016, con una cantidad de vehículos en operación de 6700, cifra muy alta comparada con lo ocurrido en el año 2010, donde se presentaron 4415 accidentes de tránsito con 15.312 vehículos en operación del TPC; por lo anterior, se realizó una investigación de la accidentalidad del SITP.

El objetivo de la presente investigación es plantear lineamientos para la prevención de la accidentalidad y encontrar sus causas en los corredores del SITP, aná-

lisis basado en los cinco pilares estratégicos del Plan Nacional de Seguridad Vial de 2012. Adicionalmente, como hipótesis nula se plantea que más del 50 % de los eventos de accidentalidad se generan a una distancia inferior o igual a 40 metros del paradero, debido a infraestructura deficiente en paraderos; como hipótesis alternativa se plantea que menos del 50 % de los eventos de accidentalidad se producen a una distancia inferior o igual a 40 metros del paradero, debido a infraestructura deficiente en paraderos.

El anterior análisis se basa en las siguientes teorías:

### Teoría del dominó

Según W. H. Heinrich (1931), quien desarrolló la denominada teoría del “efecto dominó”, el 88 % de los accidentes están provocados por actos humanos peligrosos, el 10 %, por condiciones peligrosas y el 2 % por hechos fortuitos. Propuso una “secuencia de cinco factores en el accidente”, en la que cada uno actuaría sobre el siguiente de manera similar a como lo hacen las fichas de dominó, que van cayendo una sobre otra. He aquí la secuencia de los factores del accidente:

- Antecedentes y entorno social.
- Fallo del trabajador.
- Acto inseguro unido a un riesgo mecánico y físico.
- Accidente.
- Daño o lesión.

Heinrich propuso que, del mismo modo en que la retirada de una ficha de dominó de la fila interrumpe la secuencia de caída, la eliminación de uno de los factores evitaría el accidente y el daño resultante, siendo la ficha cuya retirada es esencial la número 3. Si bien Heinrich no ofreció dato alguno en apoyo de su teoría, ésta presenta un punto de partida útil para la discusión y una base para futuras investigaciones.

### Teoría de la causalidad múltiple

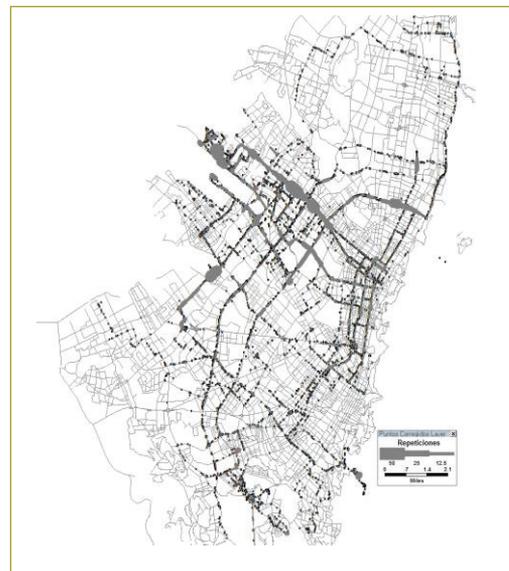
Aunque procede de la teoría del dominó, la teoría de la causalidad múltiple defiende que, por cada accidente, pueden existir numerosos factores, causas y subcausas que contribuyan a su aparición, y que determinadas combinaciones de éstos provocan accidentes. De acuerdo con esta teoría, los factores propicios pueden agruparse en las dos categorías siguientes:

**De comportamiento.** En esta categoría se incluyen factores relativos al trabajador, como una actitud incorrecta, la falta de conocimientos y una condición física y mental inadecuada.

**Ambientales.** En esta categoría se incluye la protección inapropiada de otros elementos de trabajo peligrosos y el deterioro de los equipos por el uso y la aplicación de procedimientos inseguros.

El principal aporte de esta teoría es poner de manifiesto que un accidente pocas veces –por no decir ninguna– es el resultado de una sola causa o acción.

## RESULTADOS

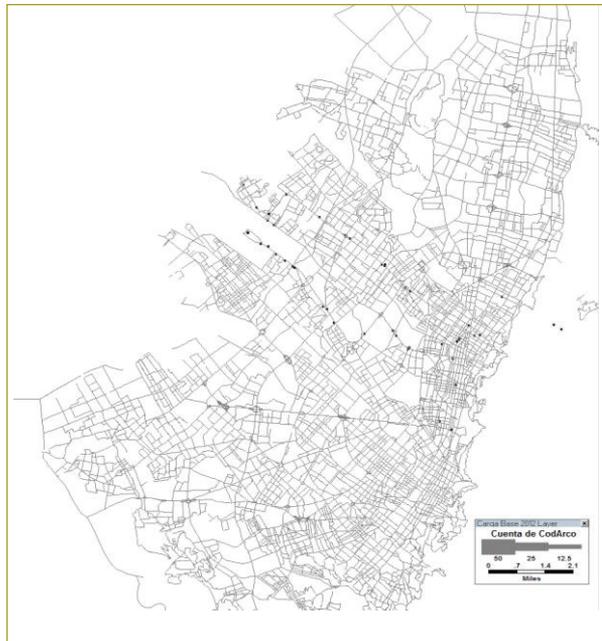


**Figura 1.** Mapa de densidad de puntos de accidentes de tránsito (septiembre de 2012 - junio de 2017).

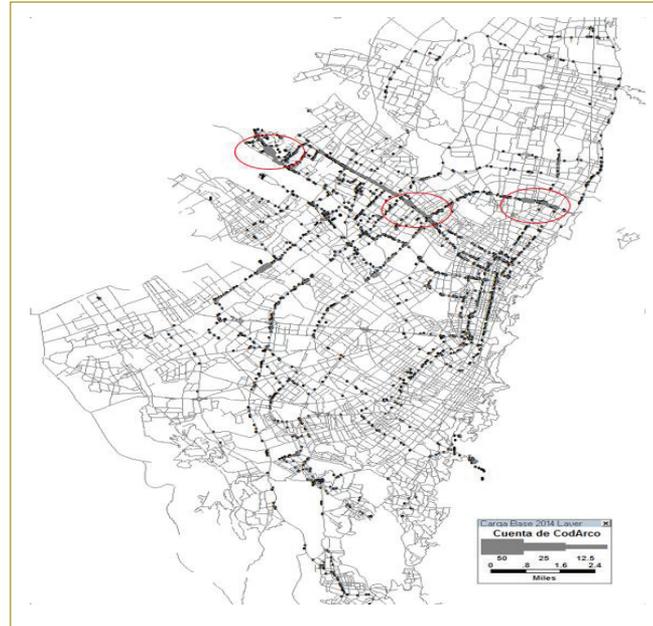
Si bien los eventos de accidentes de tránsito son generalizados a lo largo de los corredores del Sistema Integrado de Transporte Público, existen zonas de mayor concentración.

Durante el primer año de operación, la flota del SITP era muy baja respecto a las condiciones actuales, y no presentaba una tendencia clara de los posibles puntos críticos.

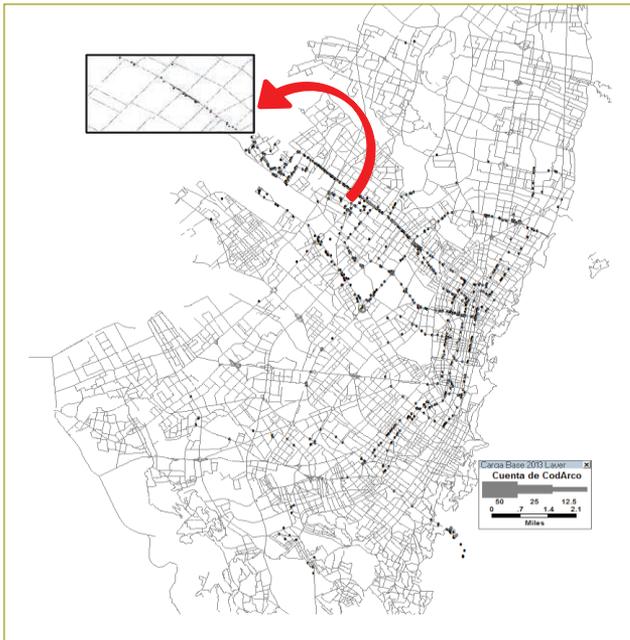
Para el año 2013, el corredor de la avenida calle 72 se empieza a perfilar como una de las zonas más críticas y la salida del sector de Engativá se convierte en una zona de alto riesgo.



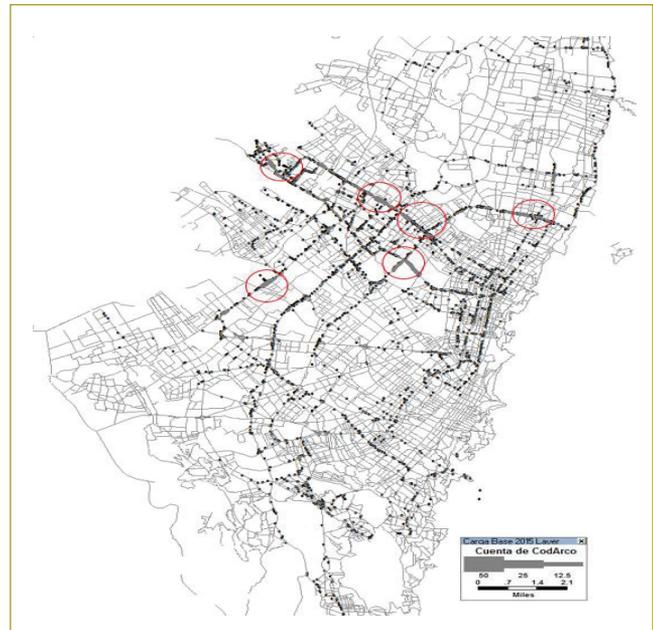
**Figura 2.** Mapa de calor de accidentes de tránsito en el año 2012.



**Figura 4.** Mapa de calor de accidentes de tránsito en el año 2014.



**Figura 3.** Mapa de calor de accidentes de tránsito en el año 2013.

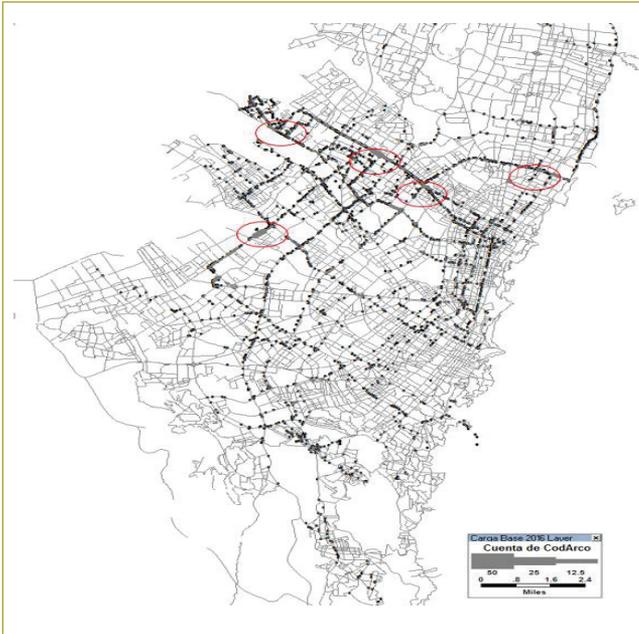


**Figura 5.** Mapa de calor de accidentes de tránsito en el año 2015.

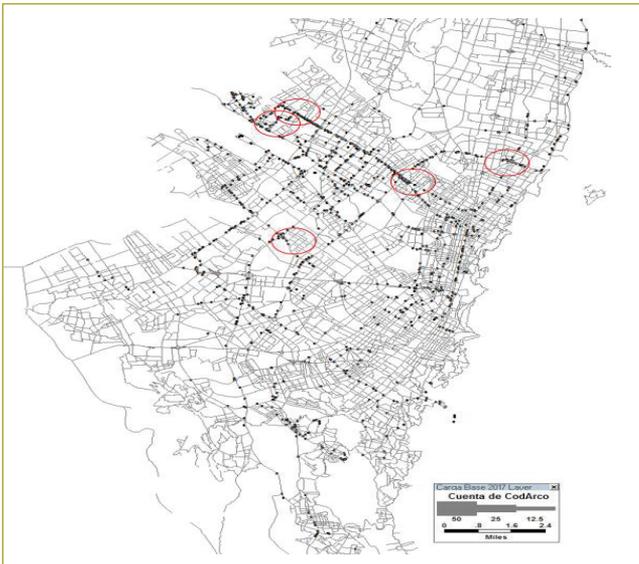
Para el año 2014 ya hay tres zonas de riesgo, dos de las cuales coinciden con la información del año 2013; además, aparece la glorieta de la calle 100 con carrera 15 como un nuevo sector de alta accidentalidad.

En el año 2015, el sector de la avenida calle 72 con avenida carrera 68 ingresa dentro de las zonas más accidentadas y se perfila como uno de los puntos más críticos.

El año 2016 tiene características similares al 2015 y los puntos más críticos en accidentalidad se consolidan, como se observa en el mapa.



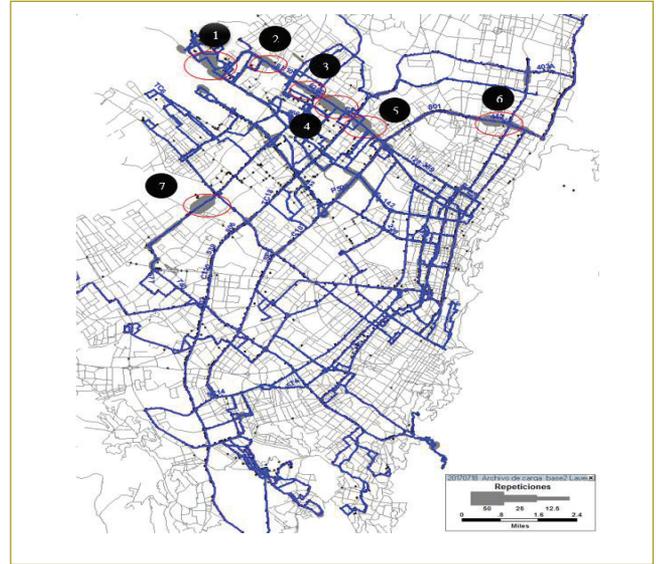
**Figura 6.** Mapa de calor de accidentes de tránsito en el año 2016.



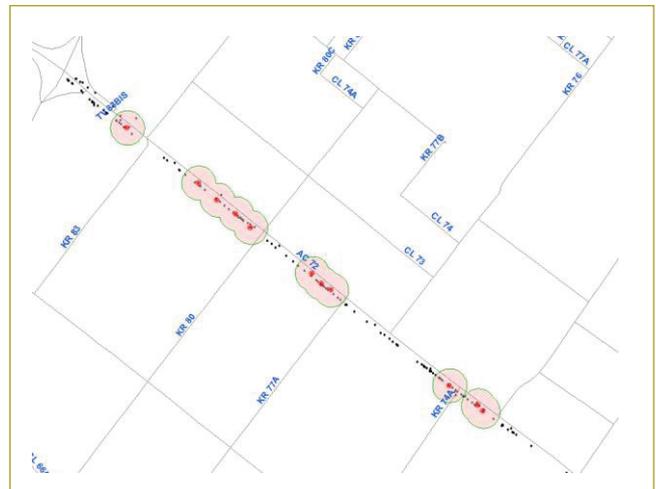
**Figura 7.** Mapa de calor de accidentes de tránsito en el año 2017.

En el primer semestre de 2017 se observa un comportamiento similar al de años anteriores, lo que muestra una tendencia en la accidentalidad de los vehículos asociados a este operador.

De acuerdo con las tendencias mostradas, el mapa general de accidentalidad arroja como posibles puntos de análisis siete zonas de riesgo; al cruzar estas zonas con las rutas asociadas, se observan de manera más clara los corredores donde se tiene influencia.

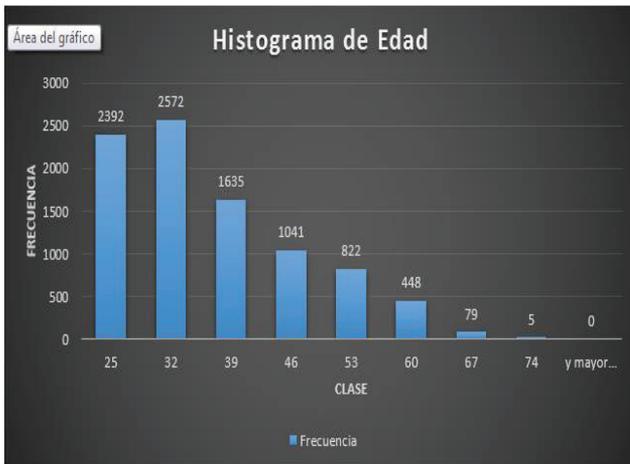


**Figura 8.** Sectores de mayor accidentalidad (total de registros válidos).



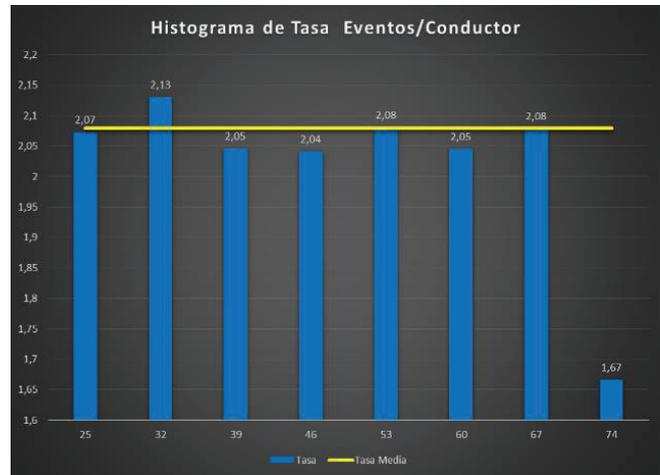
**Figura 9.** Área de influencia de los paraderos (muestra).

Se puede apreciar un radio de influencia de 40 metros en paraderos, valor asumido de acuerdo con las longitudes de las colas, esperas para acceso a paraderos y maniobras de giro para salidas de éstos; para ello se tomó como referencia la longitud de los vehículos tipo busetón de 50 pasajeros. Esta área de influencia es el área en la cual se considera en el presente estudio que un accidente está asociado a un paradero (figura 9).



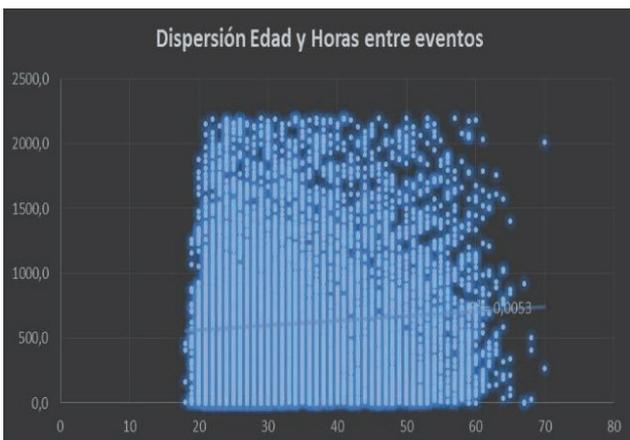
**Figura 10.** Histograma de la variable edad (total de registros válidos).

El histograma por edad muestra una alta concentración de la accidentalidad entre los 18 y los 32 años, con mayor acentuación en la población entre los 26 y los 32 años.



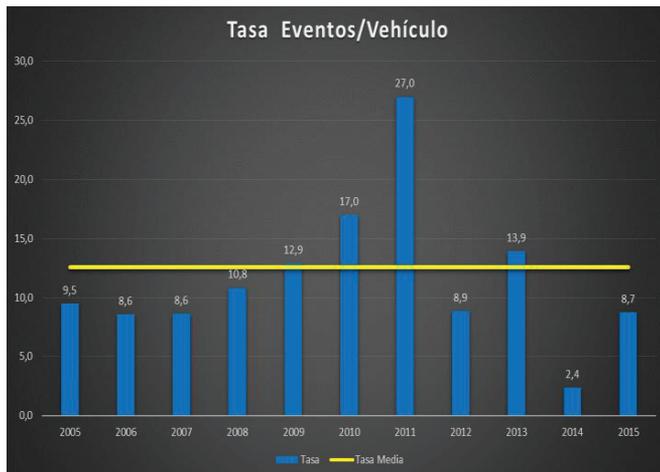
**Figura 12.** Tasa de eventos por conductor (total de registros válidos).

Esta figura es coherente con la información suministrada en la figura 10, ya que las mayores tasas de accidentalidad se generan entre los 18 y los 32 años (figura 12).



**Figura 11.** Dispersión de las variables edad y horas entre eventos (total de registros válidos).

En la dispersión de las variables edad y horas entre eventos (figura 11) hay una concentración significativa en las primeras 500 horas de operación y una menor concentración por encima de las 1500 horas entre eventos. De la misma manera, se observa que por encima de los 35 años se presenta menor frecuencia de accidentes; sin embargo, el valor de correlación es 0,07295929.

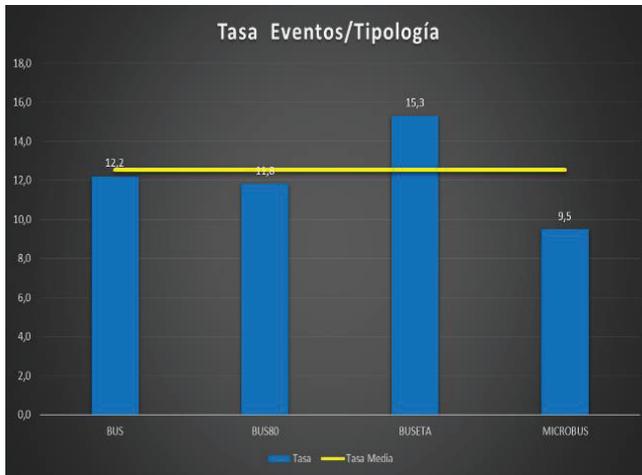


**Figura 13.** Tasa de eventos por vehículo (total de registros válidos).

Aunque los vehículos de modelo 2011 son relativamente actuales, son los que más cantidad de accidentes reportan respecto al total de la población.

En la figura siguiente se aprecia un efecto similar, donde la mayor cantidad de vehículos son de tipo buse-tón; sin embargo, la mayor tasa de eventos por tipología se encuentra en la tipología buseta (figura 14).

Una vez procesados y depurados los datos, se cargaron a TransCAD. El comportamiento general de la accidentalidad de los vehículos asociados a la zona de



**Figura 14.** Tasa de eventos por tipología (total de registros válidos).

estudio que tienen una influencia directa en el corredor de la avenida calle 72 es fácil de observar (figura 1).

Se crearon mapas de densidad asociando eventos al arco más cercano de la red de transporte y posteriormente se generó un mapa de densidad (zonas demarcadas con color gris). Además, con el propósito de corroborar la tendencia de la información, se crearon mapas por año que evidenciaron el comportamiento de la accidentalidad y posibles zonas de riesgo de acuerdo con el ingreso de la flota sujeta al plan de implementación (figuras 2 a 7).

Una vez definida la población (tabla 1), se estima el tamaño de la muestra con el cálculo de  $n$  en poblaciones finitas.

$N$  = tamaño de la población.

$e$  = error de muestreo.

$p$  = probabilidad a favor.

$q$  = probabilidad en contra.

$Z$  = valor correspondiente al nivel de confianza del 95 %.

$n$  = tamaño de la muestra.

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q}$$

$N = 8618$

$e = 0,05$

$p = 0,5$

$q = 0,5$

$Z = 1,96$ , correspondiente a un 95 % de confianza

$n = 368$

Posteriormente, mediante muestreo por conglomerados y a partir de los sectores de mayor accidentalidad, se realiza un muestreo por conglomerados. Este análisis se basó en la información registrada en TransCAD para evaluar los sectores de mayor accidentalidad y el número de eventos en cada uno de ellos; así, se obtiene:

Sector 1: 247 eventos.

Sector 2: 81 eventos.

Sector 3: 149 eventos.

Sector 4: 366 eventos.

Sector 5: 361 eventos.

Sector 6: 249 eventos.

Sector 7: 79 eventos.

De acuerdo con lo anterior, el sector con mayor cantidad de eventos es el N.º 4, con 366.

*Supuesto 1:* Todos los eventos son homogéneos.

Como consecuencia de lo anterior y de acuerdo con el valor de  $n$  obtenido, se observa que el valor de  $n = 368$  y el valor del sector 4 = 366 son cercanos (figura 8), por lo cual se establece el sector 4 como el tramo de estudio de la presente investigación (figura 9).

En el análisis de información no se consideró la severidad, y se incluyeron los accidentes, incidentes y percances, de conformidad con la definición del manual de operaciones del SITP para el componente zonal.

**Tabla 1**  
Depuración de datos, fase 3

Ítem	Número
Registros totales	12.431
Registros repetidos	107
Sin descripción en columna afectación	338
Coordenadas X o Y con datos inválidos	504
Posición real = No	176
Tipo de servicio = alimentador o troncal	63
Total parcial	11.243
Códigos de conductor inválidos	70
Códigos inexistentes en el reporte de nómina	228
Otros	12
Sin evento 1 + horas periodo de prueba	1333
BoxPlot	606
Vehículos con códigos incorrectos	376
Total general	8618
% datos válidos como población	69,3

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Del objetivo general

Se plantean como lineamientos de seguridad vial para la prevención de la accidentalidad vial en los corredores del SITP las siguientes premisas:

- El mayor valor es la vida misma.
- No se transportan personas, se mueve el futuro.
- La mayor prueba del respeto por la vida es el respeto por las normas de tránsito.
- Identificar los puntos más críticos de accidentalidad es prevención.
- Reforzar la seguridad vial en todos los módulos de capacitación.
- Realizar campañas periódicas de sensibilización.
- Realizar por lo menos una campaña de seguridad vial en vía, cada dos meses, en la zona de mayor accidentalidad en ese bimestre y referente al tema relacionado con la causa de los accidentes.
- Reforzar el plan de inducción en hábitos de conducción.
- Con excepción de casos especiales, no rotar a los conductores entre tipologías o rutas en las primeras 400 horas de operación.
- Involucrar a los diferentes actores de la vía.
- Cada tipología usada debe contener una ruta de entrenamiento a la que ingresen conductores nuevos o de ascensos.

### De los objetivos específicos

#### Gestión institucional

Si bien no es concluyente, si se carece de un proceso de reconstrucción de accidentes se reduce la posibilidad de aprendizaje sobre las causas reales de la accidentalidad y la capacidad de realimentación al personal relacionado con el análisis, seguimiento y control de la accidentalidad de las compañías operadoras del SITP.

Aunque en la columna causalidad de la base de datos se tiene información de la imputación, se sugiere hacer una separación entre responsable y causa; por lo tanto, se plantea la opción de tener dos columnas: una en que se maneje el pilar estratégico en el que se enmarca el evento y otra (causalidad) en que se registren los comportamientos o variables que influyeron en éste, teniendo en cuenta que en un mismo evento pueden influir diferentes pilares y diferentes variables.

Para estandarizar los criterios de codificación de causalidad se sugiere realizar *focus group* que incluyan a conductores, personal de la operación y técnicos de control, entre otros. El resultado será la causalidad por pilar estratégico, con el fin de permitir un análisis multicriterio y, como consecuencia, una estrategia integral.

Se recomiendan el diseño, puesta en marcha y seguimiento de un procedimiento de reconstrucción de accidentes.

#### Comportamiento humano

Aun cuando no existe una correlación directa entre la edad y la cantidad de horas de conducción entre eventos, se evidencia que la edad sí es un factor que incide en la accidentalidad, de acuerdo con la información analizada; para el presente análisis la edad entre 26 y 32 años representa la mayor frecuencia de accidentalidad (figura 10).

Se recomienda hacer un seguimiento histórico por conductor, ya que algunos de ellos están cercanos a los 30 eventos.

Se recomienda hacer un análisis detallado de la correlación entre edad >40 y las horas entre eventos, con el fin de confirmar las observaciones de la figura 11, mayor tiempo entre eventos por encima de 40 años.

Realizar un análisis de multicausalidad de los eventos asociados a conductores con edades inferiores o iguales a los 32 años, dado que de acuerdo a la figura 12 poseen las mayores tasas con las mayores representatividades de la población.

Enfocar el diseño de estrategias de prevención en el personal con edades inferiores a los 32 años, según el análisis de multicausalidad sugerido.

Hacer un análisis de causalidad de cada primer evento por conductor generado entre las primeras 400 horas de operación, equivalentes a los dos meses del periodo de prueba, para reforzar el plan de inducción, dado que cerca del 10,7 % de conductores tienen eventos durante este periodo.

En casos de ascensos, aunque el conductor tiene experiencia, si pasa a un vehículo de mayores dimensiones, caso busetón - padrón, existe mayor probabilidad de accidentalidad.

### Atención y rehabilitación de víctimas

No existe un seguimiento continuo a víctimas que permita la sensibilización como canal de prevención de la accidentalidad.

### Infraestructura

Los accidentes a lo largo del tramo analizado, y de manera visual en el aplicativo TransCAD, tienen un comportamiento similar. Hay mayor aglomeración de eventos cercanos a paraderos en una vía de dos carriles por sentido y sin bahías para paraderos.

Existen paraderos cercanos a intersecciones con distancias aproximadas de 60 metros, lo que puede ocasionar colas de vehículos y posibles obstaculizaciones de las intersecciones por motivo del ascenso y descenso de pasajeros.

Realizar inspecciones en campo de las condiciones operativas en vía de los tramos presentados en la figura 14, evaluando, velocidad, iluminación, señalización.

### Vehículos

De acuerdo con las condiciones generales de accidentalidad analizadas en el presente artículo, la edad de la flota no está relacionada con la frecuencia de la accidentalidad (figura 13); sin embargo, es necesario mejorar la calidad del registro de información en la variable causalidad, con el fin de encontrar causas reales más que una simple clasificación.

Hacer un análisis de los eventos asociados a la flota de modelo 2013, atribuible al pilar estratégico vehículos con causalidad mantenimiento o falla mecánica.

Se recomienda realizar un análisis integral para la tipología buseta, dada la alta tasa de eventos (figura 14), que contemple infraestructura en tramos comunes por ruta basados en las siete zonas de mayor riesgo detectadas en el presente estudio.

Según las condiciones generales de accidentalidad analizadas, las horas donde se presenta la mayor cantidad de eventos relacionados con la accidentalidad corresponde a las 7, 8, 18 y 19 horas, momentos conocidos como horas pico o saliendo de pico para el tipo de día hábil; sin embargo, son instantes donde el 100 % de los vehículos del Sistema Integrado de Transporte Público se encuentran en la vía, con excepción de casos por fuerza mayor, como mantenimiento correctivo, fallas de última hora o falta de conductor.

### Recomendaciones generales

Elaborar un modelo de pronóstico de accidentes, de acuerdo con criterios multivariados. Se sugiere tener en cuenta la edad, cantidad de accidentes, cantidad de horas entre eventos y probabilidad o riesgo.

Gestionar una red de apoyo y capacitación de conductores a escala distrital que involucre una colaboración mutua de los sectores público y privado que permita contar con un banco de datos para la contratación de conductores líderes en la vía.

### De la hipótesis

Se acepta  $H_0$ .

No se puede afirmar que menos del 50 % de la muestra tienen una distancia inferior o igual a 40 metros del paradero, con un nivel de significancia del 5 %.

### De la teoría al campo

Es necesario realizar tomas de información de manera periódica, en vía, que permita la calibración del instrumento de recolección de datos usado para el registro de la información.

### Contribuciones de la investigación

Permite un acercamiento a las condiciones de operación del SITP, en las que se evidencia una *big data* gestionable para la toma de decisiones.

Para el caso del Sistema Integrado de Transporte Público, el presente análisis no arroja una correlación entre la edad y la cantidad de horas entre eventos asociados a la accidentalidad, ni tampoco de la variable edad y número de eventos.

### Recomendaciones para futuras investigaciones

Realizar un análisis de causalidad de los datos asociados a los eventos generados por debajo de las 400 horas de operación.

Mejorar el proceso de registro de la información, en especial en ítems como causalidad.

Elaboración de una matriz de riesgos de sectores viales para el fortalecimiento de campañas en vía que involucren diversos actores, como peatón, ciclista y motociclista.

Hacer un análisis detallado de causalidad en el rango de edad entre los 26 y 32 años que permita evidenciar comportamientos que influyan en la accidentalidad.

Realizar un análisis de colas en paraderos cercanos y posteriores a las intersecciones para determinar la tasa de llegada y la longitud de ésta de los vehículos que acceden al paradero evaluado.

## REFERENCIAS

- CCB y Universidad de los Andes (2011). Accidentalidad vial. *Observatorio de Movilidad* (6), p. 27.
- CCB y Universidad de los Andes (2015). *Observatorio de Movilidad* (9), p. 27.
- Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2016). La importancia del factor humano en la explicación de los accidentes de tránsito. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* (102), p.16.
- González y Posada (2009). [www.scielo.org.co](http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n53/n53a09.pdf). Medellín, Colombia. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n53/n53a09.pdf>.
- Icar, Fuentelsaz & Pulpón (2006). [www.publicacions.ub.edu](http://www.publicacions.ub.edu/refs/indices/06677.pdf). Recuperado de <http://www.publicacions.ub.edu/refs/indices/06677.pdf>.
- Ministerio de Transporte (2015). Plan Nacional de Seguridad Vial. Colombia, 2011-2021. Recuperado de [https://www.mintransporte.gov.co/Publicaciones/plan\\_nacional\\_de\\_seguridad\\_vial](https://www.mintransporte.gov.co/Publicaciones/plan_nacional_de_seguridad_vial).
- OIT (2001). *Enciclopedia de la OIT*. Recuperado de <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo2/56.pdf>.
- OMS (2013). *Informe sobre la situación mundial de la seguridad vial 2013*. Recuperado de [http://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2013/report/summary\\_es.pdf](http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2013/report/summary_es.pdf).
- OMS (2011). *Plan Mundial para el Decenio de Acción para la Seguridad Vial, 2011-2020*. Recuperado de [http://www.who.int/roadsafety/decade\\_of\\_action/plan/plan\\_spanish.pdf?ua=1](http://www.who.int/roadsafety/decade_of_action/plan/plan_spanish.pdf?ua=1).
- Redacción Bogotá (2017). Buses del SITP, involucrados en más de 4600 accidentes en sólo 2016. *El Espectador*. Recuperado de <http://www.elespectador.com/noticias/bogota/buses-del-sitp-involucrados-mas-de-4600-accidentes-solo-articulo-674546>.
- Runyan, C. (1998). *Using the Haddon Matrix: Introducing the Third Dimension*. Injury Prevention.
- Tamayo, M. (2007). *El proceso de la investigación científica*. México: Limusa S.A.
- Vargas, D. (2015). *Comportamiento de muertes y lesiones por accidentes de transporte*. Recuperado de <http://www.medicinalegal.gov.co/documents/88730/3418907/8.+ACCIDENTES+DE+TRANSPORTE-1+parte.pdf/5e486319-b05d-4ad5-8a25-5f8576fff729>.

# Estudio de la calidad trófica del humedal Gualí - Tres Esquinas

## Gualí–Tres Esquinas wetland trophic quality

MANUEL ANDRÉS GONZÁLEZ MALAGÓN<sup>1</sup> - HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hídricos y Medioambiente.

2. Magíster en Ingeniería Civil. Profesor de planta.

manuel.gonzalez-ma@mail.escuelaing.edu.co - hector.matamoros@escuelaing.edu.co

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

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

### Resumen

El humedal Gualí - Tres Esquinas se encuentra a 2535 m.s.n.m., abarca un área aproximada de 1294,3 hectáreas y está ubicado en la parte central de la cordillera Oriental, en el occidente de la sabana de Bogotá, entre los municipios de Funza, Mosquera y Tenjo, a un costado de la Troncal de Occidente.

Este humedal es el límite natural entre Funza y Mosquera, convertido actualmente en un eje de desarrollo urbano, en cuya ribera se localizan conjuntos residenciales, parques industriales, instituciones educativas y edificaciones gubernamentales.

Debido a su ubicación geográfica, la cuenca de recarga hídrica se ha venido reduciendo, sometiendo el cuerpo lagunar a fuertes presiones que deterioran la calidad del recurso hídrico y ponen en riesgo la flora y fauna que allí habita.

Durante un recorrido perimetral se identificaron once puntos de descarga de aguas lluvias, cuatro descargas directas de aguas residuales, una de la planta de tratamiento de Funza y un punto de recarga y cinco de drenaje, operados por el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones de La Ramada.

Aplicando los modelos propuestos por Karydis (1983), con el índice de eutrofización (IE), se determinó que el humedal presenta zonas mesotróficas y eutróficas. Por otra parte, utilizando la metodología de Vollenweider y la distancia inversa ponderada (IDW), utilizando el *software* ArcGis, se estableció que se encuentra en un grado eutrófico. Con dicho nivel de eutrofia se evidencia el fuerte impacto que genera

en el humedal la recarga que realiza el Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones de La Ramada con aguas del río Bogotá, captadas a la altura del río Chicú, en el municipio de Cota, y el efecto de las descargas directas de aguas residuales provenientes de las cabeceras municipales de Funza y Mosquera.

**Palabras claves:** humedal, eutrofización, descarga.

### Abstract

The Gualí - Tres Esquinas wetland sits at 2,545 MAMSL, is about 1,294.3 hectares, and is located on the Eastern mountain range center region, west of the Bogota Savannah, between the municipalities of Funza, Mosquera, and Tenjo, by the Western Highway.

This wetland is a natural border between Funza and Mosquera, it is now an axis of urban development, whose riverside hosts gated communities, industrial parks, education institutions, and government buildings. Due to its geographic location, the infiltration basin has been shrinking, submitting the body of water to strong pressures that deteriorate this hydric resource's quality and threatens the flora and fauna living there. During a perimeter run, eleven rainwater discharge points could be identified, as well as four direct wastewater discharges, one from Funza's treatment plant, an infiltration point, and five drainage points managed by La Ramada's Hydraulic System of Environmental and Flood Control.

By using Karydis's (1983) models, eutrophication index (EI), it could be determined that the wetland has mesotrophic and eutrophic zones.

Additionally, using Vollenweider's methodology and inverse distance weighted (IDW), using ArcGis software, it was concluded that it is at a eutrophic level.

Such a eutrophic level shows the strong impact on the wetland generated by La Ramada's Hydraulic System of Environmental and Flood Control infiltration with water coming from the Bogotá River, collected from the Chicú river in the municipality of Cota, and the effect of direct wastewater discharges coming from the towns of Funza and Mosquera.

**Keywords:** wetland; eutrophication; discharge.

## INTRODUCCIÓN

El humedal Gualí - Tres Esquinas y lagunas del Funzhé cubre un área aproximada de 1294,3 hectáreas, está a 2535 m.s.n.m. y se ubica en la parte central de la cordillera Oriental, en el sector occidental de la sabana de Bogotá, en jurisdicción de los municipios de Funza, Mosquera y Tenjo, sobre un costado de la carretera Troncal de Occidente.

La determinación del grado de eutrofización que presenta el humedal se estimó por medio de la aplicación de los modelos de índice de eutrofización (IE), Vollenweider y distancia inversa ponderada (IDW), mediante el *software* ArcGis.

La eutrofización en los cuerpos de agua es consecuencia del incremento nutricional, debido a la concentración y a la carga existente de nitrógeno y fósforo, principalmente en sus afluentes. A medida que avanza el estado trófico de un cuerpo lagunar, de oligotrófico a mesotrófico y eutrófico, la biomasa aumenta y disminuye la calidad del agua, haciendo más difícil su uso para abastecimiento y recreación<sup>1</sup>.

## CAUSAS DE LA EUTROFIZACIÓN

La principal causa es el incremento de la carga de nutrientes por diversas vías, especialmente de las fracciones de fósforo y nitrógeno. Dicho aumento se puede presentar en forma natural o por procesos exógenos:

### Naturales

- Arrastre de nutrientes por la escorrentía generada por precipitaciones.
- Proliferación de maleza acuática.
- Descomposición de materia orgánica localizada en el fondo de los cuerpos lagunares.
- Incremento de partículas suspendidas que aumentan la turbidez del agua.
- Disminución del oxígeno disuelto.

### Externas

- Desarrollo de actividades agrícolas en zona ribereña al cuerpo lagunar.
- Descargas directas de aguas residuales domésticas o industriales.
- Descarga directa de aguas lluvias que puedan arrastrar materia orgánica.
- Disposición de basuras o escombros.
- Urbanizaciones asentadas en la periferia, lo cual produce un incremento en los sedimentos que pueden llegar al cuerpo de agua.

Tomando como base el desarrollo de actividades en inmediaciones de los cuerpos lagunares, Salas & Martino (1990) determinaron los valores en gramo promedio anual por metro cuadrado de fósforo total y nitrógeno total en función del uso del suelo (tabla 1).

**Tabla 1**  
Coeficiente de exportación en función del uso de la tierra (Salas & Martino, 1990)

Uso de la cuenca	Fósforo total (g/m <sup>2</sup> /año <sup>-1</sup> )	Nitrógeno total (g/m <sup>2</sup> /año <sup>-1</sup> )
Urbano	0,1	0,5
Agrícola	0,05	0,5
Forestal	0,01	0,3

Fuente: N. Mazzeo y otros. *Eutrofización: causas, consecuencias y manejo*.

Así mismo, establecieron los valores promedio generados por personas, animales o semovientes (tabla 2).

1. J. Romero (2009). *Calidad del agua* (3.ª ed.). Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, p. 413.

**Tabla 2**

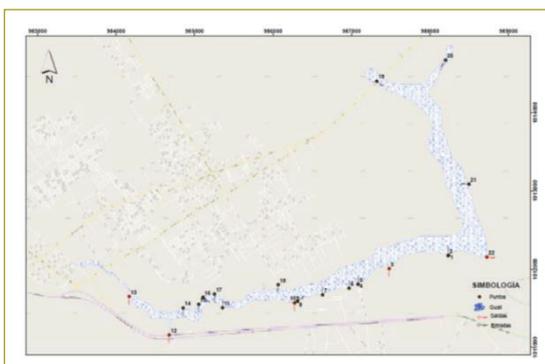
Aportes de fósforo y nitrógeno total de animales utilizados en la explotación ganadera y por persona (Salas & Martino, 1990)

	Fósforo total (g/hab <sup>-1</sup> o animal <sup>-1</sup> /año)	Nitrógeno total (g/hab <sup>-1</sup> o animal <sup>-1</sup> /año <sup>-1</sup> )
Personas	1000 g*hab <sup>-1</sup> *año <sup>-1</sup>	
Vacunos	7000	54.750
Porcinos - ovinos	3000	14.600
Caballos	4500	18.250
Patos y similares	300	474,5

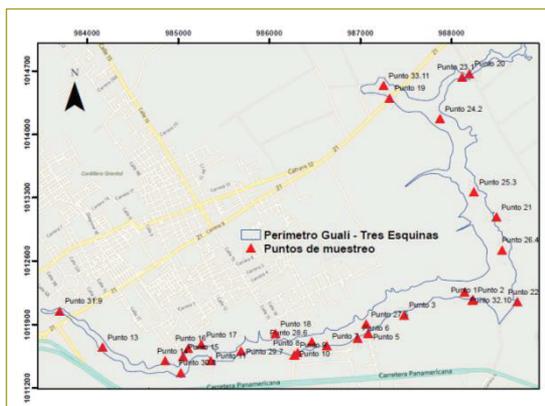
Fuente: N. Mazzeo y otros. *Eutrofización: causas, consecuencias y manejo*.

## METODOLOGÍA

Mediante el desarrollo de 3 campañas de muestreo, se tomaron muestras a lo largo del humedal en 33 estaciones, de las cuales 22 se localizaron en las diferentes descargas y drenajes y 11 en el interior del humedal. En total, se tomaron 99 muestras, a las cuales se les determinaron las cargas de fósforo y clorofila, entre otros. Los puntos de descargas y drenajes, así como las estaciones de muestreo, se detallan a continuación (figuras 1 y 2).



**Figura 1.** Puntos de descargas.



**Figura 2.** Estaciones de muestreo.

El análisis climatológico de la zona en estudio se realizó conforme a los registros de la estación climatológica La Ramada, suministrados por el grupo climatológico de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

El grado de eutrofia presente en el humedal se determinó mediante las metodologías planteadas a continuación:

### Índice de eutrofización por nutriente<sup>2</sup>

Metodología creada por Karydis et al. (1983), cuyo objetivo es definir los aportes y la disponibilidad de sustancias o nutrientes inorgánicos y evaluar sus concentraciones. Este índice establece una escala < 3 para agua oligotrófica, entre 3 y 5 para mesotrófica y > 5 para eutrófica.

Ecuación 1:

$$IE_i = \frac{C}{C - \log X_i} + \log A$$

Donde:

$IE_i$  = índice de eutrofización del nutriente en cada punto (estación) de muestreo durante el periodo de estudio, compuesto por  $M$  muestreos.

$C$  = logaritmo de la concentración total del nutriente durante la etapa de estudio en cada punto de muestreo.

$X_i$  = concentración total del nutriente durante la etapa de estudio en el punto de muestreo.

$A$  = número de puntos de muestreo durante el periodo de estudio.

### Vollenweider (1970)<sup>3</sup>

Vollenweider estableció la carga límite admisible de fósforo y nitrógeno en los años setenta, para que un lago conserve su condición oligotrófica indefinida (tabla 3), a la vez que planteó las siguientes hipótesis:

2. V. Betanzos, R. Garcés A., M. Delgado Y. & R. Pis M.A. (2012). Variación espaciotemporal y grado de eutrofia de sustancias nutrientes en aguas de los golfos de Ana María y Guacanayabo, Cuba. *Rev. Mar. Cost.*, (4), 120, pp. 117-130.
3. J. Romero (2009). *Calidad del agua* (3.<sup>a</sup> ed.). Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, p. 415.

**Tabla 3**  
Cargas de nutrientes en lagos

Profundidad media (m)	Carga permisible para lagos oligotróficos (g/m <sup>2</sup> -año)		Carga excesiva conducente a eutrofización (g/m <sup>2</sup> -año)	
	N	P	N	P
5	1,0	0,07	2	0,13
10	1,5	0,10	3	0,20
50	4,0	0,25	8	0,50
100	6,0	0,40	12	0,80
150	7,5	0,50	15	1,00
200	9,0	0,60	18	1,20

Fuente: J. Romero, *Calidad del agua*, p. 417 (tabla 9.29).

Debido a que los lagos no se ajustan a los valores de la tabla anterior, por su característica en el tiempo de retención, Vollenweider propuso las siguientes fórmulas:

Ecuación 2:

$$P = \frac{L t}{Z (1 + \sqrt{t})} ; L_c = \frac{P_c Z (1 + \sqrt{t})}{t}$$

Donde:

P = concentración del fósforo en el agua del lago, g/m<sup>3</sup>.

L = carga superficial anual de fósforo, g/m<sup>2</sup>-año.

Z = profundidad promedio, m.

t = tiempo de retención, año.

L<sub>c</sub> = carga superficial anual crítica de fósforo, g/m<sup>2</sup>-año.

P<sub>c</sub> = concentración crítica de fósforo, g/m<sup>3</sup>.

En términos generales, se acepta una concentración crítica de fósforo de 0,01 g P/m<sup>3</sup> para que un lago templado conserve el estado oligotrófico y de 0,02 g P/m<sup>3</sup> como límite de separación entre mesotrófico y eutrófico.

Para el caso de lagos cálidos tropicales, el modelo establece el fósforo como nutriente limitante, siempre que la relación nitrógeno a fósforo sea superior a 9; de lo contrario, el nitrógeno es el nutriente limitante. Con base en la concentración promedio de fósforo, se fijan los valores que se presentan a renglón seguido (tabla 4).

**Tabla 4**  
Valores de fósforo promedio

	Eutrófico	Mesotrófico	Oligotrófico
P <sub>promedio</sub> (mg/L)	0,12	0,04	0,02

Fuente: J. Romero, *Calidad del agua*, p. 418.

Para lagos limitados por el fósforo, se establece la ecuación 3:

$$P = \frac{0,29 L_c^{0,891} t^{0,676}}{Z^{0,934}}$$

Donde:

P: concentración total de fósforo total en el lago, mg/L.

L<sub>c</sub>: carga superficial anual de fósforo, g/m<sup>2</sup>año.

t: tiempo de retención, año.

Z: profundidad media, m.

P ≤ 0,03 mg/L para lagos oligotróficos.

P ≤ 0,07 mg/L para lagos mesotróficos.

#### Distancia inversa ponderada (IDW) mediante ArcGis<sup>4</sup>

Mediante la caja de herramientas de 3D Analyst, el programa ArcGis permite procesar la información recolectada en campo en los diferentes puntos de muestreo, según los siguientes principios:

- El valor de salida para una celda que utiliza la distancia inversa ponderada (IDW) se limita al rango de valores usados para la interpolación.
- Los mejores resultados de la IDW se obtienen cuando la muestra es lo suficientemente densa respecto de la variación local que intenta simular.
- La influencia de un punto de entrada sobre un valor interpolado es isotrópica.
- Ciertos *datasets* de entrada pueden tener algunos puntos con las mismas coordenadas x,y.
- Los datos de la entidad de entrada deben contener por lo menos un campo válido.

## RESULTADOS

### Tipos de descargas

En torno al humedal Gualí - Tres Esquinas se identificaron descargas directas de aguas residuales provenientes de barrios ubicados en los municipios de Funza y Mosquera, y descargas de aguas lluvias derivadas de los parques industriales asentados en el perímetro del cuerpo lagunar (tabla 5).

4. IDW (2016). ArcGisfor Desktop. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/idw.htm> el 24 de enero de 2017.

**Tabla 5**  
Relación de descargas Gualí - Tres Esquinas

Cantidad	Tipo
11	Descarga de aguas lluvias
4	Descarga de aguas residuales
1	Descarga de plantas de tratamiento
5	Puntos de drenaje
1	Punto de ingreso

Fuente: Elaboración propia.

### Resultados de laboratorio

Conforme al reporte de laboratorio presentado por el laboratorio ambiental de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), se tiene que en promedio se presentan las siguientes concentraciones: perímetro 2,79 mg/L-P de fósforo, 62,26 µg/L de clorofila e interior 3,06 mg/L-P de fósforo, 0,76 µg/L de clorofila (tabla 6).

### Caudales y cargas de fósforo

#### Aguas lluvias

El volumen generado por agua lluvia se estima a partir de la precipitación promedio anual del área en estudio, multiplicado por el área aferente, datos que se presentan posteriormente (tabla 7).

De acuerdo con esta información, se puede concluir que el humedal recibe un volumen promedio de 35,57 L/s por descarga de aguas lluvias, generando un aporte de 141.550 g/año de fósforo.

#### Aguas residuales

Los caudales se estimaron con base en los parámetros de diseño para sistemas de alcantarillados contemplados en la Norma Técnica Colombiana RAS 2000. El nivel de complejidad de los sistemas se fundamenta en la población de la cabecera municipal y en su capacidad

**Tabla 6**  
Resultado de laboratorio

Punto	Este	Norte	Clorofila 1 (ug/L)	Clorofila 2 (ug/L)	Clorofila 3 (ug/L)	Fósforo 1 (mg/L-P)	Fósforo 2 (mg/L-P)	Fósforo 3 (mg/L-P)
Punto 1	988237	1012175	747.750	21.400	57.700	0,989	3.353	2.595
Punto 2	988229	1012171	1178.645	38.200	208.000	0,830	2.146	0,576
Punto 3	987480	1012005	64.771	5.200	100.000	0,963	1.763	2.000
Punto 4	987084	1011804	89.571	40.600	19.000	2,066	2.080	2.753
Punto 5	987084	1011804	89.571	7.700	1.200	2,066	1.794	1.803
Punto 6	985959	1011754	20.539	10.100	2.000	2,973	7.952	2.417
Punto 7	985532	1011659	0,000	5.200	8.400	0,104	0,083	0,000
Punto 8	985313	1011588	28.484	187.000	18.300	0,089	1.839	0,978
Punto 9	985277	1011588	27.080	22.100	5.200	1.817	0.152	0,974
Punto 10	985273	1011557	59.042	3.200	31.700	0,254	1.573	0,922
Punto 11	985357	1011504	0,203	24.100	4.200	1,467	0,890	0,725
Punto 12	984577	1011155	0,000	1.900	3.500	0,968	1.707	0,906
Punto 13	984169	1011649	25.570	17.300	4.800	0,963	0,913	0,727
Punto 14	984855	1011501	43.444	70.100	0.000	3.311	0,874	0,762
Punto 15	985053	1011548	9,942	35.600	31.600	2.525	0,924	19.206
Punto 16	985108	1011639	203.422	9.400	1.900	1.358	6.312	17.430
Punto 17	985253	1011680	0,000	3.100	3.200	1.229	0,861	4.389
Punto 18	985055	1011799	9,567	1.000	20.600	17.051	0,960	0,252
Punto 19	987322	1014403	0,000	3.100	4.600	5.045	6.591	NA
Punto 20	988199	1014574	905.197	15.300	1.500	13.815	0,000	0,097
Punto 21	988495	1013087	43.272	0,000	43.100	13.344	NA	0,294
Punto 22	988725	1012153	40.500	9.700	23.600	1.794	0,641	0,639
Punto 23.1	988119	1014535	2,252	2.252	0,324	0,103	0,117	0,137
Punto 24.2	987874	1014177	0,590	0,590	1,574	4.567	5.062	6.820
Punto 25.3	988248	1013354	0,352	0,352	1,056	2.683	4.660	3.280
Punto 26.4	988555	1012725	0,000	0,000	0,000	0,891	0,890	0,969
Punto 27.5	987052	1011905	0,000	0,000	0,000	1.589	0,806	0,906
Punto 28.6	985455	1011713	0,000	0,000	0,000	0,635	0,845	0,975
Punto 29.7	985590	1011603	0,502	0,442	2,093	1.458	0,831	1.810
Punto 30.8	985025	1011370	0,000	0,507	0,000	1.180	0,807	0,940
Punto 31.9	983696	1012052	0,560	2,492	1,301	0,857	0,575	0,778
Punto 32.10	988144	1012259	0,578	2,307	1,275	1.058	0,877	1.500
Punto 33.11	987256	1014542	0,000	0,527	2,866	4.964	39.400	8.385

Fuente: Laboratorio de la CAR Cundinamarca.

Tabla 7

Punto	Tipo	P (mm/año)	A (ha)	Q (l/s) promedio (g/m <sup>2</sup> -año)	P <sub>total</sub> (g/año)	P <sub>aportado</sub>
1	A.LL.	792,43	18,52	4,65	0,1	18.520
2	A.LL.	792,43	26,35	6,62	0,1	26.350
5	A.LL.	792,43	3,83	0,96	0,1	3830
6	A.LL.	792,43	5,86	1,47	0,1	5860
7	A.LL.	792,43	5,86	1,47	0,1	5860
8	A.LL.	792,43	5,86	1,47	0,1	5860
9	A.LL.	792,43	5,86	1,47	0,1	5860
11	A.LL.	792,43	11,16	2,80	0,1	11.160
14	A.LL.	792,43	34,5	8,67	0,1	34.500
16	A.LL.	792,43	6,17	1,55	0,1	6170
20	A.LL.	792,43	17,58	4,42	0,1	17.580
			Σ	35,57		141.550

Fuente: Elaboración propia.

económica. Según dicha metodología, se establece que el nivel de complejidad es alto, con una dotación neta máxima de 140 L/hab\*día y un coeficiente de retorno de 0,85 (tabla 8).

Tabla 8

Carga dispersa de fósforo por aguas residuales

Punto	Tipo	Poblacional (hab/km <sup>2</sup> )	A (km <sup>2</sup> )	Habitantes	Q (L/s)	P <sub>total</sub> (g/m <sup>2</sup> -año)	P <sub>aportado</sub> (g/año)
4	AR	1061*	0,0636	67	2,21	0,1	63,6
15	AR	773*	0,0617	44	1,45	0,1	61,7
17	AR	1061*	0,0857	91	3	0,1	85,7
18	AR	1061*	0,2183	232	7,67	0,1	218,3
19	PT				120**		
				Σ	14,35		429,3

Fuente: Elaboración propia.

\* Dato tomado de la ficha de caracterización del Departamento Nacional de Planeación.

\*\* Dato tomado de los reportes entregados por la empresa de servicios públicos de Funza a la CAR.

El humedal recibe un volumen promedio de 35,57 L/s por descarga de aguas residuales, generando un aporte de 429,3 g/año de fósforo.

### Aporte por escorrentía

La estimación de las áreas que se emplean como potreros o de cobertura en pastos se realizó mediante la medición directa en imagen satelital, en tanto que el

valor promedio de fósforo se tomó de la clasificación de Salas & Martino (1990), como se resume en la tabla siguiente (tabla 9).

Tabla 9

Carga dispersa de fósforo por escorrentía

Uso	C	I (mm/año)	A (ha)	Q (L/s)	P <sub>total</sub> (g/m <sup>2</sup> -año)	P <sub>aportado</sub> (g/año)
Pastos	0,3	792,43	413,70	103,95	0,05	206.850

Fuente: Elaboración propia.

### Aporte puntual

Según los registros de bombeo efectuados mediante la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones, durante el año 2016 se captaron 176.310.000 m<sup>3</sup> desde el río Bogotá, con un promedio de 5,59 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 97.470.000 m<sup>3</sup> se llevaron al humedal Gualí - Tres Esquinas, correspondiente a 3,09 m<sup>3</sup>/s. Por temas prácticos se asume el valor promedio anual de fósforo que se obtuvo en cada uno de los muestreos (tabla 10).

Tabla 10

Fecha del muestreo	Campaña	A <sub>superficial humedal</sub> (m <sup>2</sup> )	Q (L/s)	P (mg/L-P)	P (mg/s-P)	P (g/m <sup>2</sup> -año)
28/05/2016	1	1558900	3090	13,344	41232,96	834,13
20/08/2016	3	1558900	3090	0,294	908,46	18,38

Fuente: Elaboración propia.

### Carga total de fósforo

La carga total de fósforo presente en el humedal se determinó a partir de las cargas puntuales, la escorrentía y las descargas directas de aguas lluvias (A.LL.) y residuales (A.R.). Para el caso de las que se generaron por escorrentía, aguas lluvias y residuales, se dividió por el área superficial del humedal para determinar los gramos por metro cuadrado de fósforo disperso (tabla 11).

Conforme a la sumatoria de los aportes generados por las descargas directas, escorrentía y recarga, se establece que el humedal presenta una carga total de fósforo para la campaña de muestreo del 28 de mayo de 2016 de 834,35 g/m<sup>2</sup>-año y 18,60 g/m<sup>2</sup>-año para la campaña del 20 de agosto de 2016.

**Tabla 11**

Fecha del muestreo	Campaña	Puntual (g/m <sup>2</sup> -año)	Escorrentía (g/m <sup>2</sup> -año)	A.LL. (g/m <sup>2</sup> -año)	A.R. (g/m <sup>2</sup> -año)	P <sub>total</sub> (g/m <sup>2</sup> -año)
28/05/2016	1	834,13	0,13	0,091	0,00028	834,35
20/08/2016	3	18,38	0,13	0,091	0,00028	18,60

Fuente: Elaboración propia.

**Aplicación del modelo**

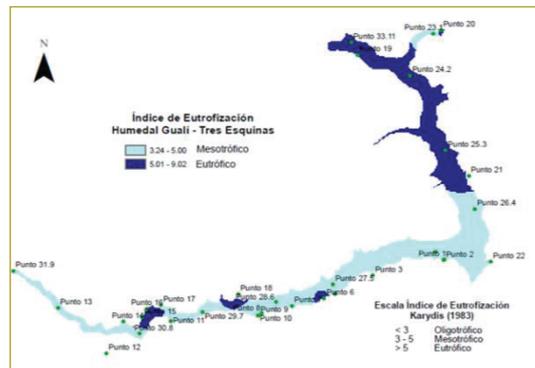
**Índice de eutrofización (IE).** Según la metodología presentada por Karydis, el humedal presenta un grado mesotrófico y eutrófico en sus aguas, según el uso de la ecuación 1 de los datos de la tabla 11 (tabla 12).

**Tabla 12**

Índice de eutrofización por fósforo en el humedal Gualí - Tres Esquinas

Punto	C	Xq	A	Log Xq	Log A	IE	Tipo
1	5,45	6938.00	33	3.84	1.52	4.91	Mesotrófico
2	5,45	3552.00	33	3.56	1.52	4.41	Mesotrófico
3	5,45	4726.00	33	3.67	1.52	4.59	Mesotrófico
4	5,45	6899.00	33	3.84	1.52	4.90	Mesotrófico
5	5,45	5663.00	33	3.75	1.52	4.73	Mesotrófico
6	5,45	13342.00	33	4.13	1.52	5.64	Eutrófico
7	5,45	187.00	33	2.27	1.52	3.23	Mesotrófico
8	5,45	2906.00	33	3.46	1.52	4.26	Mesotrófico
9	5,45	2953.00	33	3.47	1.52	4.27	Mesotrófico
10	5,45	2859.00	33	3.46	1.52	4.25	Mesotrófico
11	5,45	3082.00	33	3.49	1.52	4.30	Mesotrófico
12	5,45	3581.00	33	3.55	1.52	4.40	Mesotrófico
13	5,45	2603.00	33	3.42	1.52	4.20	Mesotrófico
14	5,45	4947.00	33	3.69	1.52	4.63	Mesotrófico
15	5,45	22755.00	33	4.36	1.52	6.51	Eutrófico
16	5,45	25110.00	33	4.40	1.52	6.72	Eutrófico
17	5,45	6479.00	33	3.81	1.52	4.85	Mesotrófico
18	5,45	18263.00	33	4.26	1.52	6.11	Eutrófico
19	5,45	11636.00	33	4.07	1.52	5.46	Eutrófico
20	5,45	13913.00	33	4.14	1.52	5.70	Eutrófico
21	5,45	13638.00	33	4.13	1.52	5.67	Eutrófico
22	5,45	3074.00	33	3.49	1.52	4.30	Mesotrófico
23.1	5,45	357.00	33	2.55	1.52	3.40	Mesotrófico
24.2	5,45	16569.00	33	4.22	1.52	5.95	Eutrófico
25.3	5,45	10603.00	33	4.03	1.52	5.35	Eutrófico
26.4	5,45	2540.00	33	3.40	1.52	4.19	Mesotrófico
27.5	5,45	3301.00	33	3.52	1.52	4.34	Mesotrófico
28.6	5,45	2456.00	33	3.39	1.52	4.17	Mesotrófico
29.7	5,45	3899.00	33	3.59	1.52	4.45	Mesotrófico
30.8	5,45	2927.00	33	3.47	1.52	4.27	Mesotrófico
31.9	5,45	2221.00	33	3.35	1.52	4.11	Mesotrófico
32.10	5,45	3435.00	33	3.54	1.52	4.37	Mesotrófico
33.11	5,45	52749.00	33	4.72	1.52	9.03	Eutrófico

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.** Índice de eutrofización del humedal Gualí - Tres Esquinas.

**Vollenweider.** De acuerdo con la metodología planteada, se establece que el humedal presenta un grado eutrófico, según el planteamiento detallado a continuación y usando las ecuaciones 2 y 3.

**Campaña 1**

- Fórmula lagos cálidos

Profundidad media (Z): 2,03 m  
 Área superficial (As): 155,89 ha  
 Caudal total (Q) = 3,24 m<sup>3</sup>/s  
 Carga total de fósforo: 834,35 g/m<sup>2</sup> - año

$$t = \frac{Z * A}{Q} = \frac{2,03 * 1558900}{3,24 * 86400 * 365} = 0,031 \text{ años}$$

$$P = \frac{0,29 L_c^{0,991} t^{0,676}}{Z^{0,924}} = \frac{0,29 * 834,35^{0,991} * 0,031^{0,676}}{2,03^{0,924}} = \frac{11,104}{1,9374} = 5,73 \rightarrow \text{Eutrófico}$$

- Usando la tabla 3. Cargas de nutrientes en lagos:

$$t = \frac{Z * A}{Q} = \frac{2,03 * 1558900}{3,24 * 86400 * 365} = 0,031 \text{ años}$$

Carga límite permisible de fósforo para lagos templados: se estima una concentración crítica de fósforo de 0,02 para mesotrófico.

$$L_c = \frac{P_c Z (1 + \sqrt{t})}{t} = \frac{0,02 * 2,03 (1 + \sqrt{0,031})}{0,031} = \frac{0,0477}{0,031} = 1,54 \text{ g / m}^2 \text{ - año}$$

Carga límite permisible de fósforo para lagos cálidos tropicales: se estima una concentración promedio de fósforo de 0,12 mg/L para eutrófico.

$$L_c = \left[ \frac{PZ^{0,924}}{0,29t^{0,676}} \right]^{0,991} = \left[ \frac{0,12 * 2,03^{0,924}}{0,29 * 0,031^{0,676}} \right]^{0,991} = \left[ \frac{0,2325}{0,0277} \right]^{0,991} = 10,88 \text{ g / m}^2 - \text{año}$$

Carga anual de fósforo sobre el lago:

$$L_p = 834,35 \text{ g/m}^2 - \text{año}$$

Como la carga anual sobre el lago es mayor que la admisible para lagos templados y cálidos tropicales, se deduce que es eutrófico.

### Campaña 3

- Fórmula lagos cálidos

Profundidad media (Z): 2,03 m

Área superficial (As): 155,89 ha

Caudal total (Q) = 3,24 m<sup>3</sup>/s

Carga total de fósforo: 18,60 g/m<sup>2</sup> - año

$$t = \frac{Z * A}{Q} = \frac{2,03 * 1558900}{3,24 * 86400 * 365} = 0,031 \text{ años}$$

$$P = \frac{0,29 L_c^{0,991} t^{0,676}}{Z^{0,924}} = \frac{0,29 * 18,60^{0,991} * 0,031^{0,676}}{2,03^{0,924}} = \frac{0,3747}{1,9374} = 0,19 \rightarrow \text{Eutrófico}$$

- Usando la tabla 3. Cargas de nutrientes en lagos:

$$t = \frac{Z * A}{Q} = \frac{2,03 * 1558900}{3,24 * 86400 * 365} = 0,031 \text{ años}$$

Carga límite permisible de fósforo para lagos templados se estima una concentración crítica de fósforo de 0,02 para mesotrófico.

$$L_c = \frac{P_c Z (1 + \sqrt{t})}{t} = 1,54 \text{ g / m}^2 - \text{año}$$

Carga límite permisible de fósforo para lagos cálidos tropicales: se estima una concentración promedio de fósforo de 0,12 mg/L para eutrófico.

$$L_c = \left[ \frac{PZ^{0,924}}{0,29t^{0,676}} \right]^{0,991} = 10,88 \text{ g / m}^2 - \text{año}$$

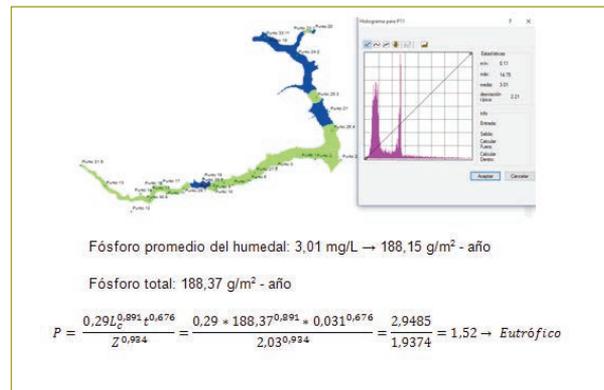
Carga anual de fósforo sobre el lago:

$$L_p = 18,60 \text{ g/m}^2 - \text{año}$$

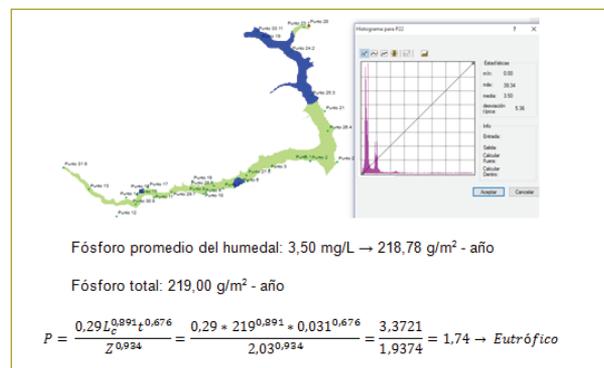
Como la carga anual sobre el lago es mayor que la admisible para lagos templados y cálidos tropicales, se deduce que es eutrófico.

**Distancia inversa ponderada (IDW).** Conforme al análisis estadístico obtenido de la interpolación generado mediante el *software* ArcGis, y al planteamiento establecido por Vollenweider según la ecuación 3, se establece que la ciénaga presenta un grafo eutrófico.

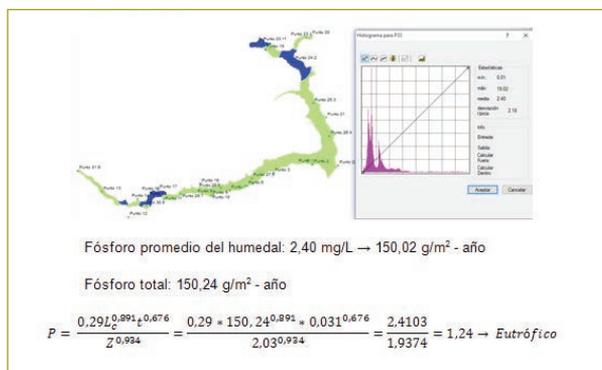
- Campaña 1



- Campaña 2



- Campaña 3



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

1. El humedal Gualí - Tres Esquinas es un cuerpo hídrico regulado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), mediante la operación del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones de La Ramada, el cual es operado y mantenido para prestar los servicios de riego, drenaje, control de inundaciones a los municipios de Funza y Mosquera, y para la preservación y conservación de la flora y fauna que alberga. Este cuerpo de aguas es receptor de diversos tipos de aves migratorias y hogar de especies en peligro de extinción, así como de diferentes anfibios y reptiles.
2. Este cuerpo de agua se encuentra seriamente afectado por el desarrollo urbano que han sufrido los municipios de Funza y Mosquera, con los cuales limita, viéndose afectada su recarga hídrica natural y convirtiéndose en el receptor de escombros y basuras. Durante el estudio de campo se identificaron cuatro puntos de descarga directa de aguas residuales y once de aguas lluvias, que inciden directamente en la calidad del recurso hídrico.
3. Las aguas del humedal presentan valores de concentración de fósforo entre 2,40 y 3,01 mg/L, en promedio.
4. Con base en la metodología propuesta por Vollenweider, se concluye que el humedal se encuentra en un estado eutrófico, generado por el enriquecimiento de nutrientes como el fósforo, lo cual produce una alta proliferación de plantas acuáticas, las que aumentan la turbidez del agua, aportan nutrientes en su ciclo natural de vida y disminuyen la cantidad de

oxígeno disuelto, poniendo en riesgo la flora y la fauna que lo habitan.

5. Aplicando la metodología de Karydis (índice de eutrofización por nutrientes) se pudo establecer que los puntos de descarga de aguas residuales, así como la recarga efectuada a través del sistema hidráulico La Ramada, generan una alta incidencia en el nivel de eutrofización del humedal, produciendo zonas eutróficas en las áreas cercanas y de influencia de dichos puntos y zonas mesotróficas en el resto del cuerpo lagunar.
6. Según el análisis estadístico, al aplicar la interpolación IDW a las campañas de muestreo de fósforo se estableció que las aguas presentan niveles de concentración de fósforo entre 2,04 y 3,5 mg/L, que al aplicarse en el modelo de Vollenweider generan condición eutrófica.
7. Con base en los resultados del estudio, se puede afirmar que el humedal Gualí - Tres Esquinas presenta una condición eutrófica.

### Recomendaciones

1. Como medida de control se propone eliminar las descargas directas de aguas residuales provenientes de los municipios de Funza y Mosquera, así como ejercer un estricto control en las descargas que se originan en las plantas de tratamiento de aguas residuales del parque industrial San Carlos y del municipio de Funza. Esta labor la debe ejercer la Dirección Regional Sabana de Occidente de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, haciendo seguimiento a los planes de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV).
2. Dado que el humedal es el principal cuerpo hídrico de regulación del sistema hidráulico La Ramada, no es posible eliminar la recarga efectuada por el sistema desde la captación en el río Bogotá, pero sí resulta necesario controlar la carga de nutrientes de las aguas transportadas por dicho afluente. Una posible medida es instalar tanques sedimentadores en el canal Chicú, que dentro de la maniobra de operación se puedan remover mecánicamente.
3. Implementar un plan de manejo que permita la recuperación total del espejo de agua del humedal, retirando la vegetación flotante y generando islas en el interior para albergar y resguardar la fauna

propia y migratoria. Dada la extensión del cuerpo lagunar es necesario usar maquinaria pesada, tipo retroexcavadora anfibia o dragas anfibias de succión multipropósito, para remover el material vegetal y los sedimentos, lo cual ha demostrado ser eficiente para la extracción de material acuático, como sucedió en el caso de la laguna de Fúquene.

4. Efectuar el dragado del humedal para recuperar el vaso, lo cual permite una mejor circulación del agua y aumenta la capacidad de dilución de nutrientes.
5. Paisajísticamente, el humedal ofrece grandes oportunidades de recreación activa y pasiva, como el avistamiento de aves y la práctica de deportes acuáticos no motorizados, para lo cual es necesario generar campañas de concientización con la población circundante, de tal manera que se genere un mayor sentido de pertenencia.

## REFERENCIAS

- Betanzos V., Garcés R., A., Delgado M., Y. & Pis R., M.A. (2012). Variación espaciotemporal y grado de eutrofia de sustancias nutrientes en aguas de los golfos de Ana María y Guacanayabo, Cuba. *Rev. Mar. Cost.*, vol. 4, 120, pp. 117--130.
- Biocolombia (2004). Informe final del plan de manejo y propuesta de delimitación de un área natural protegida en el humedal Gualí - Tres Esquinas. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Consortio CGT (2007). Informe final, contrato CAR N.º 419 de 2005. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- IDW (2016). ArcGis for Desktop. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/idw.htm> el 22 de febrero de 2017.
- Romero, J. (2002). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. (2009). *Calidad del agua* (3ª. ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, pp. 413-415.
- Tibaquirá, P.M. (2014). *Análisis de la calidad trófica del embalse El Hato* (tesis de maestría). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Villamarín, L. M. (2014). *Análisis de la calidad trófica de la laguna de Fúquene* (tesis de maestría). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

# Correlaciones de ensayos de campo SDMT, CPT y laboratorio para caracterización de arcillas en el sector comprendido entre la calle 127 y La Caro, en Bogotá

Correlations between SDMT and CPT field tests and laboratory tests to characterize clays in the area between calle 127 and La Caro in Bogotá

ÍNGRID PAOLA GARCÍA

Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

ingrid.garcia@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 10/01/2018 Aceptado: 31/01/2018

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

## Resumen

El presente artículo tiene como objetivo dar a conocer la caracterización de las arcillas que se encuentran comprendidas entre la calle 127 y La Caro, en la ciudad de Bogotá. Para lo anterior, se tomaron en cuenta ensayos básicos de laboratorio (humedad del suelo, límites de Atterberg, compresión inconfineda y consolidación) y ensayos de campo (CPT y SDMT), con los cuales se evaluaron para el parámetro de resistencia no drenada ( $S_u$ ) las correlaciones planteadas por Skempton, Jamiolkowski, Mesri y Itansbo, y para el parámetro de OCR se emplearon las correlaciones planteadas por Stas y Kulhawy, Mayne y Mitchell. Con la respectiva evaluación de las expresiones planteadas por los autores mencionados, se hizo una comparación con los resultados de campo ( $S_u$ , OCR), para posteriormente definir las ecuaciones de correlación características para el suelo en estudio. Con estas ecuaciones de correlación anteriormente mencionadas, se puede obtener una aproximación a los resultados de  $S_u$  y OCR, a partir de los ensayos de laboratorio y campo.

**Palabras claves:** arcillas, caracterización, consolidación, correlación.

## Abstract

This article is aimed at sharing the characterization of clays found between calle 127 and La Caro, in the city of Bogotá. To achieve this, basic laboratory tests were accounted for (soil humidity, Atterberg limits, unconfined compression, and consolidation) as well as field tests (CPT and SDMT). Correlations were assessed for undrained shear strength ( $S_u$ ), using the ones proposed by Skempton, Jamiolkowski, Mesri, and Itansbo, and for OCR, using the ones from Stas and Kulhawy, Mayne, and Mitchell. The results of the expressions suggested by the aforementioned authors prompted a comparison with the field results ( $S_u$ , OCR), thus defining the correlation equations for soil under study. These correlation equations can provide an approximation to the  $S_u$  and OCR results, based on laboratory and field tests.

**Keywords:** clays; characterization; consolidation; correlation

## INTRODUCCIÓN

Los suelos del sector en estudio de la ciudad de Bogotá se caracterizan por ser arcillas blandas de alta compresibilidad y baja resistencia, las cuales deben analizarse muy bien ante cualquier toma de decisiones en términos de ingeniería, ya que estas arcillas tienen alta plasticidad, baja consistencia o resistencia al corte y gran espesor, motivo por el cual deben tratarse de la mejor manera para evitar que se presenten fallas en obras de construcción.

Estas arcillas presentan un reto de vital importancia para la cimentación de edificaciones livianas y pesadas, pues desde hace un par de décadas empezaron a evidenciarse hundimientos en los suelos de algunos sectores, lo que se atribuye tanto a las características geológicas del terreno como a la intervención humana.

En este trabajo de investigación se crean curvas de correlación que permitan producir una caracterización del comportamiento mecánico más acertada de las arcillas en el sector comprendido entre la calle 127 y La Caro, en Bogotá, y de este modo proporcionar herramientas para que en futuras investigaciones puedan usarse como base para el desarrollo de proyectos. Igualmente, se propone una base metodológica para buscar otras bases de correlación entre parámetros obtenidos de ensayos de campo y laboratorio y las propiedades mecánicas de arcillas blandas.

Dichas correlaciones se obtuvieron a partir de datos recolectados por Ingeniería y Georriesgos SAS

en investigaciones geotécnicas en la zona geográfica mencionada anteriormente.

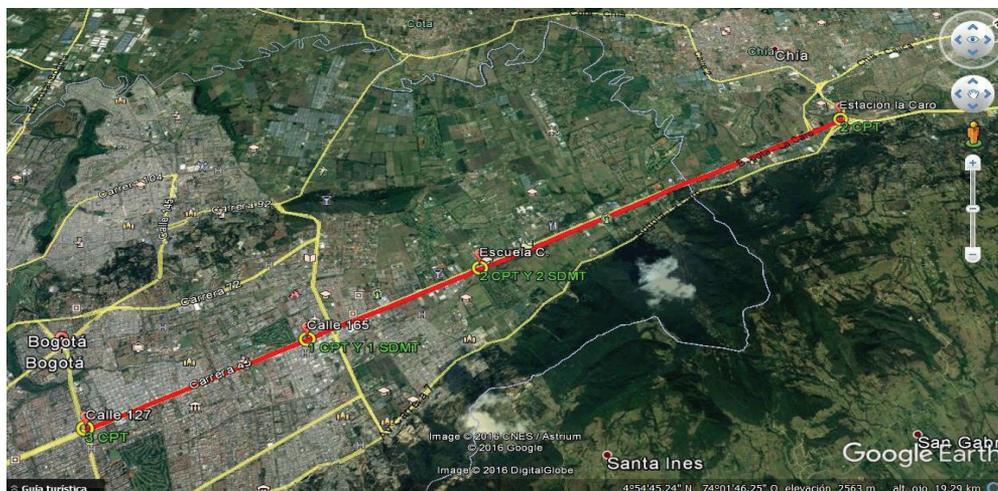
## LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio que se determinó para el desarrollo de este estudio fueron la calle 127, calle 165, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y la autopista norte; con una recolección de laboratorios distribuidos de la siguiente manera:

- 8 ensayos de penetración de cono (CPT).
- 3 ensayos de dilatómetro sísmico (SDMT).
- 223 determinaciones de humedad.
- 115 límites de Atterberg.
- 61 compresiones inconfiadas.
- 3 consolidaciones unidimensionales.

Más adelante se muestra la localización de las zonas de estudio empleadas en esta investigación (figura 1).

Teniendo en cuenta el mapa de zonificación geotécnica de Bogotá (figura 2), se pueden apreciar la delimitación precisa y la subdivisión de las zonas de piedemonte, así como la subdivisión de las unidades de planicie (lacustre, lacustre-aluvial y llanura de inundación). En la zona de estudio se puede observar que el perfil de suelo se encuentra compuesto por arcillas limosas muy blandas, con baja a media capacidad portante y muy compresible.



**Figura 1.** Localización general del área de estudio (figura tomada y adaptada de Google Earth, 2015).

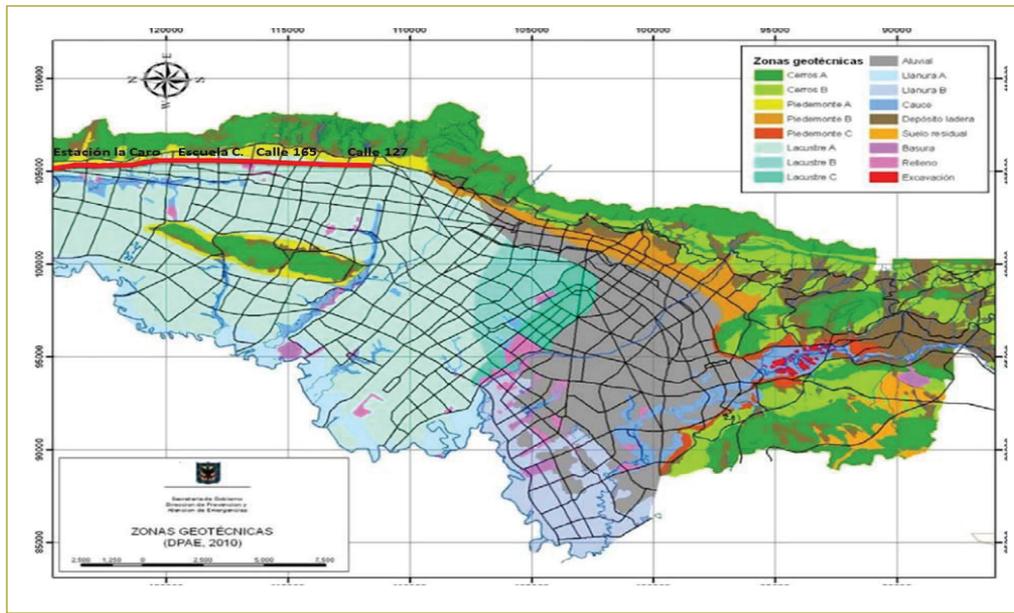


Figura 2. Mapa de zonificación geotécnica de Bogotá (tomada del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias, 2010).

**RESULTADOS**

**Análisis de información**

Para cada uno de los puntos de estudio, luego de analizar e interpretar los resultados de laboratorio y de campo, se emplearon ecuaciones de correlación para estimar los valores de resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) y relación de sobreconsolidación (OCR). Se evaluó y verificó la utilidad de cuatro correlaciones para  $S_u$  de

diferentes autores y tres para OCR, a partir de los datos ya obtenidos.

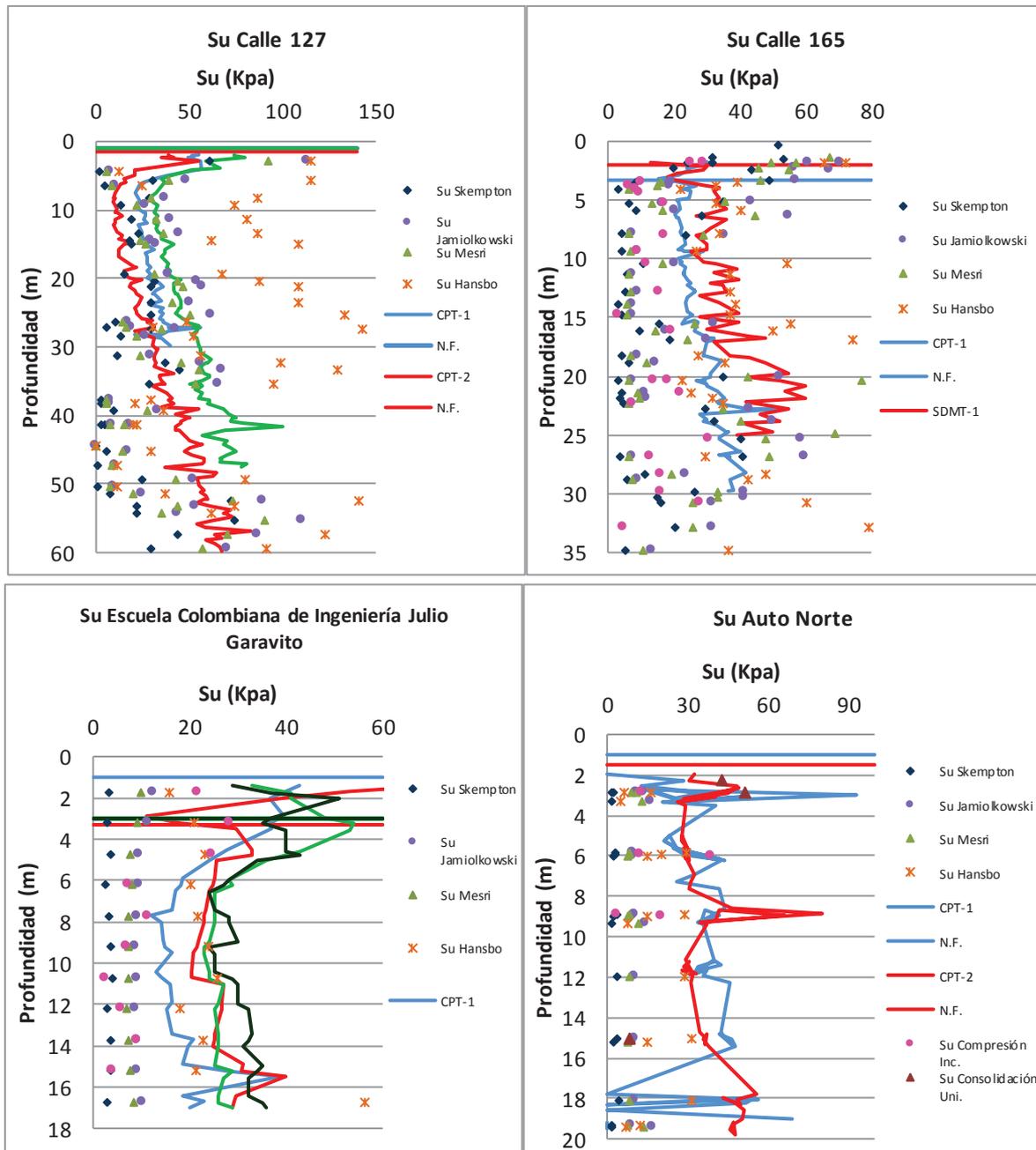
En la tabla siguiente se muestran las ecuaciones utilizadas para las correlaciones, para cada uno de los parámetros, según los ensayos de laboratorio (tabla 1).

En los ensayos de campo se tomaron profundidades iniciales, intermedias y finales, puesto que las profundidades en los ensayos de laboratorio no se encontraban puntuales, sino en rangos.

**Tabla 1**  
Correlaciones  $S_u$  (kPa) y OCR

Ecuaciones para cálculo de $S_u$ (kPa)		Ecuaciones para cálculo de OCR	
Según Wood (1983), determina el esfuerzo efectivo vertical.	$\sigma_v/Pa = 0,063 * 10^{2(1-U)}$	Según Stas y Kulhawy (1984), determina la relación de sobreconsolidación.	$OCR = (Pa/\sigma_{vo}) 10^{(1,11 - 1,62 U)}$
Según Skempton (1957), determina la resistencia al corte no drenado.	$s_u(VST)/\sigma_{vo} = 0,11 * 0,0037 PI$	Según Mayne y Mitchell (1984), determina la relación de sobreconsolidación.	$OCR = \sigma_{VST} (s_u/\sigma_{vo})VST$
Según Stas y Kulhawy (1984), determina el esfuerzo efectivo de preconsolidación.	$\sigma_p/Pa = 10^{(1,11 - 1,62 U)}$	Según Mayne y Kulhawy (1988), determina el índice de esfuerzo en reposo.	$KO = 0,5 OCR^{0,5}$
Según Jamiolkowski (1985), determina la resistencia al corte no drenado.	$s_u/\sigma_p = 0,23 \pm 0,04$	Según Mayne y Mitchell (1984), determina la relación de sobreconsolidación.	$K_o = 0,5[(p_u/\sigma_{vo})^{0,5} 10^{(0,56 - 0,81 U)}]$
Según Mesri (1989), determina la resistencia al corte no drenado.	$s_u/\sigma_p = 0,22$		
Según Hansbo (1957), determina la resistencia al corte no drenado.	$\sigma_p = \sigma_{VST} s_u(VST)$		

Fuente: Elaboración propia, con base en F.H. & P.W., 1990.



**Figura 3.** Variación del  $S_u$  (kPa) a diferentes profundidades (elaboración propia, con base en Ingeniería y Georriesgos SAS).

En la figura anterior (figura 3) se muestran los datos recopilados de los ensayos de laboratorio y los ensayos de campo de la zona de estudio, en los que se emplearon cuatro correlaciones para  $S_u$  de diferentes autores a partir de los ensayos de laboratorio. Las ecuaciones de los autores que más se acercan a los datos de los ensayos de campo son las de Skempton, Mesri y Jamiolkowski en la calle 127 y la calle 165, y la de Hansbo en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y autopista Norte.

Así mismo, se pueden observar los datos recopilados de los ensayos de laboratorio y los ensayos de campo de la zona de estudio, en los que se usaron tres correlaciones para OCR de diferentes autores a partir de los ensayos de laboratorio. Las ecuaciones de los autores que más se acercan a los datos obtenidos de los ensayos de campo fueron las de Mayne y Mitchell, Mayne y Kulhawy (figura 4).

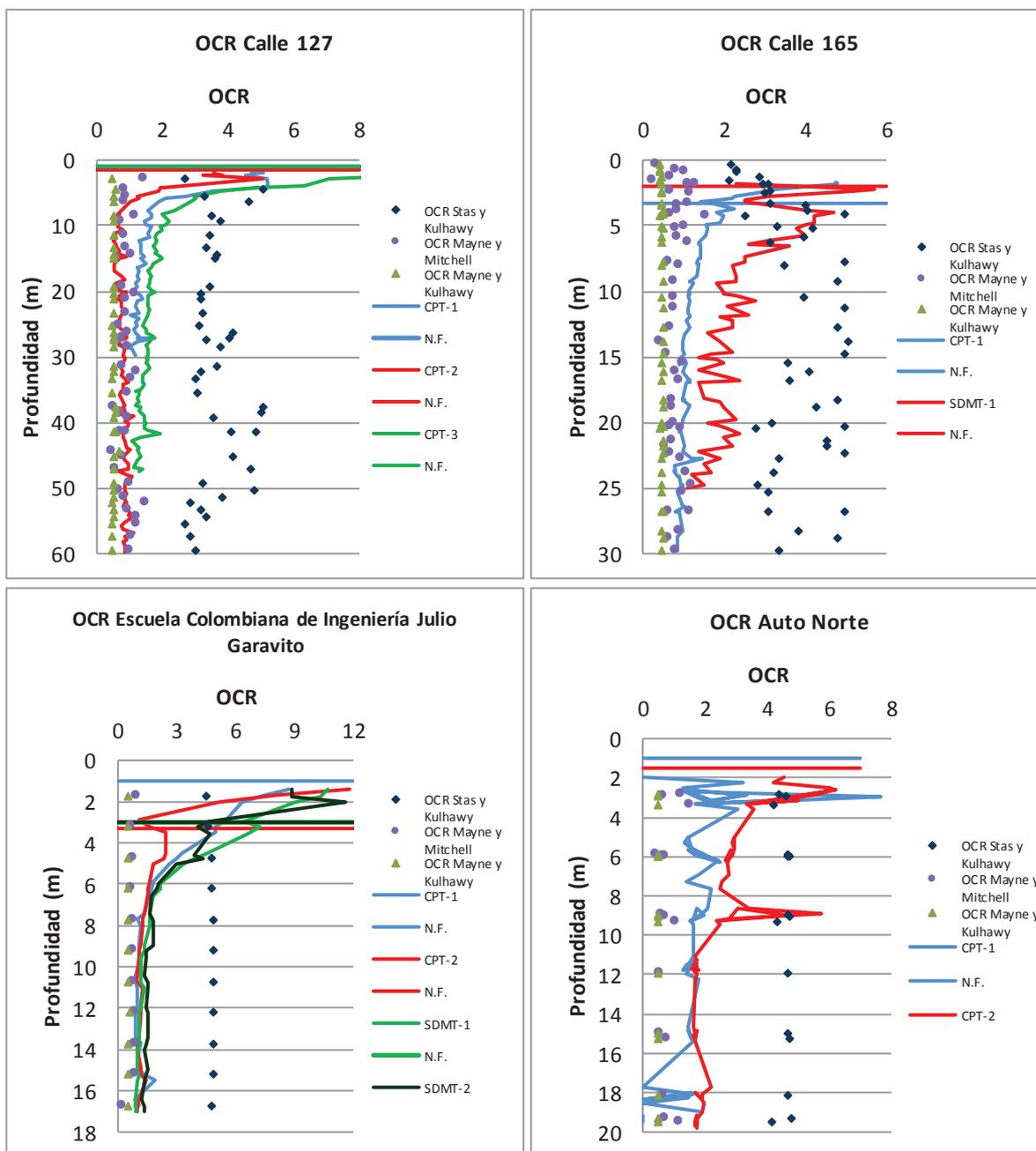


Figura 4. Variación del OCR a diferentes profundidades (elaboración propia, con base en Ingeniería y Georriesgos SAS).

### CORRELACIONES PROPIAS

De los datos recopilados de los cuatro puntos de estudio se hizo un análisis de los datos de resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) y la relación de sobreconsolidación (OCR), apoyado en los datos obtenidos de los ensayos de campo ya mencionados. Lo anterior consiste en un análisis de regresión múltiple, que es una técnica ade-

cuada para investigar el efecto simultáneo sobre una variable dependiente llamada ( $X$ ) y una o más variables independientes llamadas ( $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ ) (Wonnacott & Wonnacott, 1972).

El modelo de regresión lineal tiene la forma de:

$$X = \beta_0 + \beta_1 Y_1 + \beta_2 Y_2 + E$$

Pero en este caso, como es una regresión múltiple y no se conoce la ecuación verdadera, debe ajustarse a una ecuación estimada de la siguiente forma:

$$X = b_0 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2$$

Cuando se aplica el criterio de mínimos cuadrados para un buen ajuste en la regresión múltiple, se obtienen tres ecuaciones que hay que resolver; denominadas ecuaciones de estimación:

$$\sum y_1 x = b_1 \sum y_1^2 + b_2 \sum y_1 y_2$$

$$\sum y_2 x = b_1 \sum y_1 y_2 + b_2 \sum y_2^2$$

$$b_0 = \bar{X} - b_1 \bar{Y}_{.1} - b_2 \bar{Y}_{.2}$$

Donde se han usado las desviaciones convenientes:

$$y_1 = Y_1 - \bar{Y}_{.1}$$

$$y_2 = Y_2 - \bar{Y}_{.2}$$

$$x = X - \bar{X}$$

Para el desarrollo de esta técnica hay que tener en cuenta el coeficiente de determinación, que es una medida de bondad del ajuste del modelo y se representa con  $R^2$ , proporción de la suma de cuadrados total en X, explicada mediante el ajuste de la regresión, y la proporción o porcentaje de varianza total en X respecto a su media. Según Wonnacott & Wonnacott (1972), sus límites son los siguientes:

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

$$R^2 = \frac{\text{Varianza explicada}}{\text{Varianza total}}$$

Para las regresiones múltiples se debe considerar el  $R^2$  ajustado, cuya clasificación se puede ver a continuación (tabla 2).

**Tabla 2**  
Clasificación  $R^2$

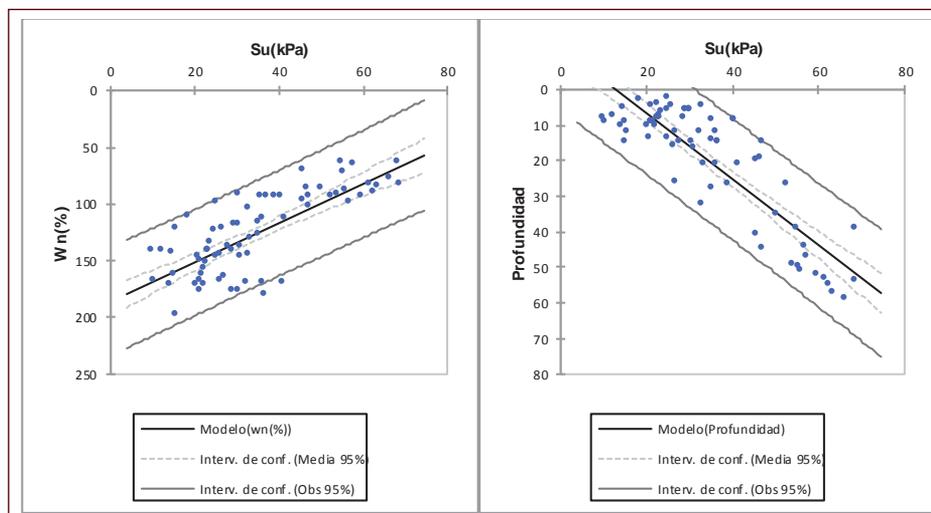
Menor de 0,3	0,3 a 0,4	0,4 a 0,5	0,5 a 0,85	Mayor de 0,85
Muy malo	Malo	Regular	Bueno	Sospechoso

Fuente: Tabla tomada de Palomo, 2011.

El nivel de confianza que se manejó para la regresión lineal múltiple fue del 95 %.

**Correlaciones para resistencia al corte no drenado ( $S_u$ )**

Se desarrollaron correlaciones propias para el parámetro de la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) a partir de los ensayos de laboratorio (humedades y límites de Atterberg) y los ensayos de campo (penetración de cono, denominado CPT, y dilatómetro sísmico, conocido como SDMT) en el área de estudio; teniendo en cuenta a su vez la profundidad. En la figura siguiente se ilustra un ejemplo de cómo se graficaron los datos para determinar una ecuación para cada uno de los parámetros evaluados, con una confiabilidad del 95 % (figura 5).



**Figura 5.** Correlación para  $S_u$  (elaboración propia, con base en Wonnacott & Wonnacott, 1972).

Para los parámetros evaluados en el cálculo de la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ), se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones para $S_u$ (kPa) a partir de la humedad y los límites de Atterberg, con una confiabilidad del 95 %								
Ensayo	Parámetro		Variables				Ecuación	Coefficiente de determinación
CPT	$S_u$ (kPa)		Wn (%)		Profundidad		$S_u$ (kPa) = 40,65+0,59*P-0,143*Wn (%)	0,79
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	9,7	68,64	64,4	198,5	2,4	59,3		
	$S_u$ (kPa)		LL (%)		Profundidad		$S_u$ (kPa) = 47,69+0,50*P-0,15*LL (%)	0,74
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	9,7	68,38	66,22	242,39	2,4	59,3		
	$S_u$ (kPa)		LP (%)		Profundidad		$S_u$ (kPa) = 51,72+0,53*P-0,45*LP (%)	0,78
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	9,81	78,56	16,5	121,97	3,2	54,25		
	$S_u$ (kPa)		IP (%)		Profundidad		$S_u$ (kPa) = 43,68+0,32*P-0,18*IP (%)	0,7
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	14,18	47,53	12,1	185	1,7	25,2		
$S_u$ (kPa)		IL		Profundidad		$S_u$ (kPa) = 57,92+0,44*P-37,72*IL	0,77	
Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima			
9,7	78,55	0,3	1,03	3,33	57,3			

Ecuaciones para $S_u$ (kPa) a partir de la humedad y los límites de Atterberg, con una confiabilidad del 95 %								
Ensayo	Parámetro		Variables				Ecuación	Coefficiente de determinación
SDMT	$S_u$ (kPa)		Wn (%)		Profundidad		$S_u$ (kPa) = 43,32+0,68*P-6,89E-02*Wn (%)	0,73
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	29	55	103,3	314,46	4,05	23,75		
	$S_u$ (kPa)		LL (%)		Profundidad		$S_u$ (kPa) = 18,89+0,56*P+5,06E-02*LL (%)	0,63
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	25	55	121,74	336,9	2,25	24,75		
	$S_u$ (kPa)		LP (%)		Profundidad		$S_u$ (kPa) = 14,86+0,20*P+0,28*LP (%)	0,68
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	23	50	33,3	98,61	2,4	24,75		
	$S_u$ (kPa)		IP (%)		Profundidad		$S_u$ (kPa) = 17,92+0,61*P+7,19E-02*IP (%)	0,63
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	25	55	50,85	238,39	2,5	24,75		
$S_u$ (kPa)		IL		Profundidad		$S_u$ (kPa) = 49,41+0,65*P-28,19*IL	0,85	
Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima			
23	55	0,35	1,03	6,2	24,75			

### Correlaciones para relación de sobreconsolidación (OCR)

Para este tipo de correlación se desarrollaron correlaciones propias para el parámetro de la relación de sobreconsolidación (OCR) para arcillas normalmente consolidadas (NC) entre 0-1 y para arcillas sebreconsolidadas (SC) entre 1-3, a partir de los ensayos de laboratorio (humedades y límites de Atterberg) y los

ensayos de campo (penetración de cono, CPT) y (dilatómetro sísmico, SDMT) en el área de estudio, teniendo en cuenta a su vez la profundidad. A continuación se muestra un ejemplo de cómo se graficaron los datos para determinar una ecuación para cada uno de los parámetros evaluados, con una confiabilidad del 95 % (figura 6).

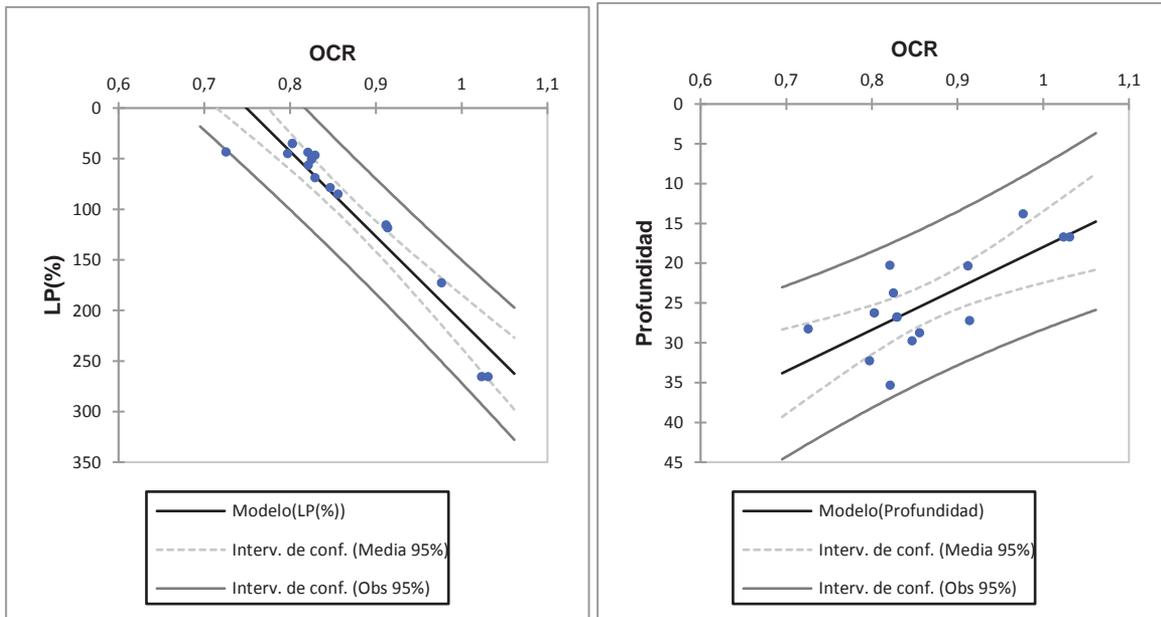


Figura 6. Correlación para OCR (elaboración propia, con base en Wonnacott & Wonnacott, 1972).

Para los parámetros evaluados en el cálculo de la relación de sobreconsolidación (OCR), se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

Ecuaciones para OCR (NC) entre 0-1, a partir de la humedad y los límites de Atterberg con una confiabilidad del 95 %								
Ensayo	Parámetro		Variables				Ecuación	Coefficiente de determinación
CPT	OCR (NC)		Wn (%)		Profundidad		OCR (NC) = 0,78+2,17E-06*P+7,12E-04*Wn (%)	0,82
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	0,8	1	71,4	333,46	10,7	59,3		
	OCR (NC)		LL (%)		Profundidad		OCR (NC) = 0,14+7,25E-03*P+2,22E-03*LL (%)	0,94
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	0,55	1	134,05	336,9	11,3	27,2		
	OCR (NC)		LP (%)		Profundidad		OCR (NC) = 0,82-1,85E-03*P+9,65E-04*LP (%)	0,9
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	0,73	1	35,18	265,8	13,8	35,35		
	OCR (NC)		IP (%)		Profundidad		OCR (NC) = 0,58-2,12E-03*P+2,61E-03*IP (%)	0,67
Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima			
0,55	0,98	27,44	198,07	10,7	25,3			
OCR (NC)		IL		Profundidad		OCR (NC) = 1,01+3,30E-03*P-0,32*IL	0,76	
Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima			
0,66	1	0,35	1,03	8,25	55,3			

Ecuaciones para OCR (SC) entre 1-3, a partir de la humedad y los límites de Atterberg, con una confiabilidad del 95 %								
Ensayo	Parámetro		Variables				Ecuación	Coefficiente de determinación
CPT	OCR (SC)		Wn (%)		Profundidad		OCR (SC) = 4,43-4,74E-02*P-1,66E-02*Wn (%)	0,72
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	1	2,85	92,54	182,64	5,95	18,75		
	OCR (SC)		LL (%)		Profundidad		OCR (SC) = 4,09-1,70E-02*P-1,31E-02*LL (%)	0,61
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	1,08	2,86	94,6	206,48	4,05	23,3		
	OCR (SC)		LP (%)		Profundidad		OCR (SC) = 2,16+1,77E-03*P-1,16E-02*LP (%)	0,64
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	1,03	1,74	43,97	101,39	5	25,2		
	OCR (SC)		IP (%)		Profundidad		OCR (SC) = 3,47-4,12E-02*P-1,27E-02*IP (%)	0,74
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	1	2,86	54,4	184,61	3,2	20,25		
OCR (SC)		IL		Profundidad		OCR (SC) = 0,35-2,62E-02*P+2,49*IL	0,79	
Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima			
1,01	2,96	0,44	0,97	3,75	25,2			

Ecuaciones para OCR (SC) entre 1-3, a partir de la humedad y los límites de Atterberg, con una confiabilidad del 95 %								
Ensayo	Parámetro		Variables				Ecuación	Coefficiente de determinación
SDMT	OCR (SC)		Wn (%)		Profundidad		OCR (SC) = 2,77-8,69E-03*P-4,21E-03*Wn (%)	0,72
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	1,1	2,4	88,1	314,46	6,2	22,8		
	OCR (SC)		LL (%)		Profundidad		OCR (SC) = 2,55+2,53E-03*P-4,53E-03*LL (%)	0,67
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	1,4	2,3	91,19	309,74	1,8	22,2		
	OCR (SC)		LP (%)		Profundidad		OCR (SC) = 2,4-5,28E-03*P-6,86E-03*LP (%)	0,69
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	1,1	2,4	35,79	172,95	1,8	24,8		
	OCR (SC)		IP (%)		Profundidad		OCR (SC) = 2,62-7,06E-04*P-4,95E-03*IP (%)	0,74
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima		
	1,3	2,4	61,4	238,97	1,8	24,8		
OCR (SC)		IL		Profundidad		OCR (SC) = 2,89+5,01E-03*P-1,46*IL	0,69	
Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima			
1,1	2,5	0,35	1,03	1,8	22,2			

## CONCLUSIONES

Con base en lo anterior, se concluyó lo siguiente:

Se han planteado una serie de ecuaciones fundadas en los datos de ensayos de laboratorio y campo, con el objetivo de poder caracterizar las arcillas en el sector comprendido entre la calle 127 y La Caro, en la ciudad de Bogotá.

Como base del trabajo de otros autores, como Skempton, Jamiolkowski, Mesri y Hansbo, para el cálculo de la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ), y autores como Mayne y Kulhawy, Stas y Kulhawy, y Mayne y Mitchell, para el cálculo de la relación de sobreconsolidación (OCR) se encontró que el uso de estas correlaciones presenta una dispersión importante, con las ecuaciones de los ensayos de campo (penetración

de cono (CPT) y dilatómetro sísmico (SDMT)) para la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) como las más satisfactorias y las menos adecuadas para su empleo en las arcillas pertenecientes a la zona en estudio.

Entre los datos de la calle 127, la calle 165, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y la autopista Norte, se presenta una buena relación entre sus datos de resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) vs. la profundidad, y la relación de sobreconsolidación (OCR) vs. la profundidad.

De acuerdo con el análisis estadístico de regresión múltiple realizado para las arcillas en el sector de estudio, para las correlaciones planteadas se utilizaron los ensayos de campo y ensayos sencillos de laboratorio para obtener correlaciones para  $S_u$ , OCR para arcillas normalmente consolidadas ( $N_c$ ) entre 0-1 y OCR para arcillas sobreconsolidadas ( $S_c$ ) entre 1-3.

De las ecuaciones planteadas para el área de estudio, se puede concluir que:

- En el área de estudio se encontró que para el cálculo de la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ), a partir de los datos de los ensayos de campo de penetración de cono (CPT) y dilatómetro sísmico (SDMT), se pueden tener en cuenta la humedad natural y los límites de Atterberg en relación con la profundidad para ecuaciones, con una confiabilidad del 95 %.
- En el área de estudio se encontró que para el cálculo de la relación de sobreconsolidación (OCR) en arcillas normalmente consolidadas ( $N_c$ ) entre 0-1 y arcillas sobreconsolidadas ( $S_c$ ) entre 1-3 a partir de los datos de los ensayos de campo de penetración de cono (CPT), se pueden tener en cuenta la humedad natural y los límites de Atterberg en relación con la profundidad para ecuaciones, con una confiabilidad del 95 %.
- En el área de estudio se encontró que para el cálculo de la relación de sobreconsolidación (OCR) en arcillas sobreconsolidadas ( $S_c$ ) entre 1-3 a partir de los datos de los ensayos de campo de dilatómetro sísmico (SDMT), se pueden tener en cuenta la humedad natural y los límites de Atterberg en relación con la profundidad para ecuaciones, con una confiabilidad del 95 %.

Se recomienda una investigación más profunda en este tema para plantear correlaciones no únicamente entre los resultados del CPT y el SDMT, sino entre los valores crudos de los datos de cada ensayo con  $S_u$  y OCR. Éstas no fueron posibles, ya que no existía un número significativo de ensayos de compresión confinada y consolidación unidimensional que permitieran esta actividad. Por ejemplo, un cálculo detallado de ciertas constantes dentro de cada ensayo para sus ecuaciones básicas puede ser un tema que hay que investigar durante futuras revisiones de este asunto.

## REFERENCIAS

- Keyhole Inc. (mayo de 2015). Google Earth. Holanda.
- Bañón Blázquez, L., & Beví García, J. (2000). *Manual de carreteras*, Vol. 2. Enrique Ortiz e Hijos.
- Das, B. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (7.a ed.). México: Cengage Learning.
- Devincenzi, M., & Frank, N. (2004). *Ensayos geotécnicos in situ*. Ingeotest.
- F. H., K., & P.W., M. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Ithaca, Nueva York: Cornell University.
- Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (2010). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sísmorresistente de edificaciones*. Bogotá: Fopae.
- Fenton, G. (1997). *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*. ASCE Geotechnical Safety and Reliability Committee.
- H., H., M.E., V., & P., C. (2007). Estimación de intervalos de confianza, pp. 3-30.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2013). NTC 1495. En *Normas Técnicas Colombianas*. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2013). NTC 1522. Bogotá: Icontec.
- Invías (2013). I.N.V.E-126. Bogotá: Invías.
- Invías (2013). I.N.V.E-125. Bogotá: Invías.
- Invías (2013). I.N.V.E-127. Bogotá: Invías.
- Invías (2013). I.N.V.E-151. Bogotá: Invías.
- Invías (2013). I.N.V.E-152. Bogotá: Invías.
- Lambe, W. (2004). *Mécanica de suelos*. México: Limusa.
- Marchetti, D., Marchetti, S., & Villalobos, F. (2013). El dilatómetro sísmico (SDMT) para ensayos de suelos *in situ*. *Obras y Proyectos* 13, pp. 20-29.
- Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration tests: a unified approach. *Can. Geotech. J.* Vol. 46, pp. 1337-1355.
- Palomo, J. (2011). *Regresión lineal múltiple*. España: UPM.
- Villalobos, F., Marchetti, S., & Marchetti, D. (2013). El dilatómetro sísmico (SDMT) para ensayos en suelos *in situ*. *Obras y Proyectos* 13, pp. 20-29.
- Mayne, P. (2007). *NCHRP Synthesis 368 Cone Penetration Testing*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Wonnacott, T., & Wonnacott, R. (1972). *Introductory statistics for business and economics*. Nueva York: John Wiley & Sons.

# Evaluación de la planta de tratamiento de agua potable del sector La Loma del Cabí, en el municipio de Quibdó

## Assessment of the Drinking Water Treatment Plant at Loma del Cabí, in the Municipality of Quibdó

ÓSCAR EDUARDO GUERRERO CHAPAL<sup>1</sup> - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

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

oscar.guerrero@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 22/01/2018 Aceptado: 20/02/2018

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

### Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la evaluación de los procesos que conforman el sistema de potabilización, su operación y su capacidad de abastecimiento.

**Palabras claves:** planta de tratamiento de agua potable (PTAP), calidad del agua, operación y mantenimiento de una PTAP.

### Abstract

This paper presents the assessment results of the processes that make up the water treatment system, its operation, and supply capacity.

**Keywords:** drinking water treatment plant (DWTP), water quality, DWTP operation and maintenance.

## INTRODUCCIÓN

En este trabajo se analizan los componentes que integran la planta de tratamiento de agua potable del sector La Loma del Cabí, en el municipio de Quibdó, atendiendo los criterios estipulados en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000, y la conformidad del tratamiento realizado con la norma de agua potable.

## DESCRIPCIÓN

La planta de tratamiento de agua potable La Loma del Cabí cuenta con una capacidad nominal de diseño de 125 L/s, que corresponde a un sistema de tipo convencional en la que se hacen los procesos de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

Para la mezcla rápida del coagulante con el agua, se aprovecha el resalto hidráulico que se produce en la caída del agua a través de un vertedero rectangular de 0,41 m de longitud. La aplicación del coagulante al agua se realiza antes del vertedero, antes del punto de mezcla rápida. Se utilizan hidroxocloruro de aluminio y cal para el ajuste de pH.

El proceso de floculación se lleva a cabo mediante dos unidades de floculación hidráulica de flujo vertical tipo Alabama. Cada floculador está constituido por doce cámaras en serie, con orificios de interconexión.

La sedimentación está constituida por tres sedimentadores de flujo laminar o de alta tasa, conformados así:

- Zona de entrada: A través de dos orificios de 0,43 x 0,70 m cada uno, dos ductos de 0,36 m de diámetro, con perforaciones en el fondo de 6,35 cm de diámetro, espaciadas cada 24 cm, y en tres hileras por ducto.
- Zona de sedimentación: Conformada por módulos tubulares fabricados en poliestireno de alto impacto, con 60 grados de inclinación y 1,05 m de altura inclinada.
- Zona de salida: Por medio de seis canales, dos por módulo de sedimentación, que descargan sus aguas en un canal central de recolección el cual las conduce al sistema de filtración.
- Zona de lodos: Con capacidad de depositar los lodos sedimentados, con compuerta de fondo de 0,36 m de diámetro para su evacuación periódica.

La filtración se realiza con seis unidades de tasa declinante y lavado mutuo, con lechos filtrantes de arena y antracita. La salida del filtro se realiza a través de una cámara de interconexión de 0,69 m de largo y 13,25 m

de ancho y dos compuertas laterales localizadas a 2,77 m del fondo, que funcionan como vertedero de salida y permiten regular la admisión del agua de lavado. El agua se desinfecta con cloro gaseoso, el cual se aplica utilizando un dosificador Hydro serie 500. El diagrama de proceso de la planta se presenta a continuación (figura 1).

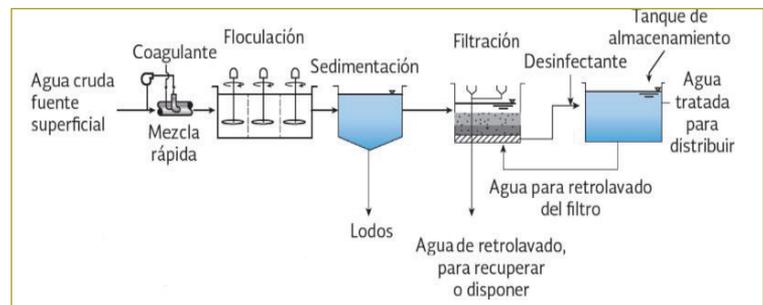


Figura 1. Diagrama de flujo de la PTAP La Loma (1).

## CALIDAD DEL AGUA

A renglón seguido se presentan los registros de laboratorio realizados por Aguas del Atrato, en el año 2015, para el agua tratada. El valor promedio de la turbiedad del agua cruda en el año fue de 32 UNT. En general, se advierten valores de turbiedad variables entre 13 y 900 UNT. Se observaron valores de color del agua cruda entre 10 y 95 UPC, con un valor promedio de  $18 \pm 8$

Tabla 1  
Resultados del monitoreo de agua tratada, año 2015

Mes	Agua tratada				
	pH	Turbiedad	Color	Alcalinidad	Cl <sub>2</sub> libre
	(Un)	(UNT)	(UPC)	(mg/L CaCO <sub>3</sub> )	(mg/L)
Enero	7,34	0,53	3,00	13,13	0,75
Febrero	7,28	0,54	3,00	12,70	0,85
Marzo	7,24	0,57	3,08	12,42	0,80
Abril	7,24	0,48	3,00	12,29	0,86
Mayo	7,26	0,51	3,00	12,33	0,92
Junio	7,27	0,54	3,00	12,29	0,93
Julio	7,34	0,57	3,00	12,96	1,00
Agosto	7,28	0,55	3,00	12,51	0,88
Septiembre	7,13	0,51	3,00	11,00	0,80
Octubre	7,14	0,54	3,00	11,32	0,63
Noviembre	7,24	0,52	3,01	12,08	0,74
Diciembre	7,11	0,50	3,00	11,61	0,82
TOTAL	7,26	0,53	3,01	12,37	0,84

**Tabla 2**  
Informe de análisis de agua cruda y tratada (1)

Análisis Agua cruda		Mayo 5 de 2016		Agostos 7 de 2016		Valores aceptables
		Agua tratada	Agua cruda	Agua tratada	Agua cruda	
Químicos	Alcalinidad	7 mg/L	12,3 mg/L	6,5 mg/L	13,2 mg/L	200 mg/L
	Aluminio	0,05 mg/L	0,19 mg/L	0,03 mg/L	0,09 mg/L	0,2 mg/L
	Dureza total	58 mg/L	50 mg/L	40 mg/L	54 mg/L	300 mg/L
	Calcio	55 mg/L	32 mg/L	45 mg/L	40 mg/L	60 mg/L
	Cloro residual libre		1,02 mg/L		0,98 mg/L	0,3 – 2,0 mg/L
	Cloruros	21,2 mg/L	20,9 mg/L	19,5 mg/L	19 mg/L	250 mg/L
	Nitritos	0,4 mg/L	0,01 mg/L	0,3 mg/L	0,01 mg/L	0,1 mg/L
	Nitratos	1,51 mg/L	0,5 mg/L	0,84 mg/L	0,8 mg/L	10 mg/L
	Hierro	1,86 mg/L	0,25 mg/L	0,89 mg/L	0,05 mg/L	0,3 mg/L
	pH	6,3 U	7,58 U	6,5 U	7,30 U	6,5 – 9,0 U
	Fosfatos	0,25 mg/L	0,11 mg/L	0,30 mg/L	0,11 mg/L	0,5 mg/L
	Sulfatos	84 mg/L	36 mg/L	76 mg/L	46 mg/L	250 mg/L
Físicos y organolépticos	Color	20,4 UPC	1,1 UPC	24,6 UPC	3,1 UPC	< 15 UPC
	Turbiedad	84 NTU	0,21 NTU	96 NTU	0,50 NTU	2 NTU
	Conductividad	62 $\mu$ s/cm	52 $\mu$ s/cm	80 $\mu$ s/cm	62 $\mu$ s/cm	1000 $\mu$ S/cm
	Temperatura	23,3 °C	18,9 °C	24,3 °C	21,9 °C	
Microbiológicos	Coliformes Totales	1680 UFC/100 ml	0 UFC/100 ml	1250 UFC/100 ml	0 UFC/100 ml	Ausencia /100 ml
	Coliformes Fecales	960 UFC/100 ml	0 UFC/100 ml	550 UFC/100 ml	0 UFC/100 ml	Ausencia/100 ml

UPC. El pH del agua cruda oscila entre 5,3 y 7,4, con un valor promedio de 6,1. La alcalinidad del agua cruda varía entre 4 y 9 mg/L, con un valor promedio de 6 mg/L. El agua cruda es agua de alta turbiedad y color, con alcalinidad muy baja, que hace necesario un control permanente y apropiado de coagulación mediante análisis frecuente de jarras.

Los valores de turbiedad para el agua tratada cumplen a lo largo del 2015 la norma establecida en la Resolución 2115 de 2009, que limita la turbiedad a un valor máximo de dos unidades nefelométricas de turbiedad (UNT). Los valores de color para el agua tratada igualmente cumplen en el año 2015 con el valor límite establecido en la resolución, que lo condiciona a un valor máximo de quince unidades en la escala de platino cobalto (UPC). La alcalinidad del agua tratada presenta valores superiores a los registrados en el agua cruda, pero es inferior al valor límite establecido de 200 mg CaCO<sub>3</sub>/L, cumpliendo con la Resolución 2115 de 2007. El residual de cloro oscila entre 0,63 y

1,0 mg/L, valores dentro del límite establecido por la resolución para agua potable. El pH del agua tratada presenta valores promedio de 7,28, cumpliendo con el límite de 6,5 a 9,0.

## PROCESOS DE TRATAMIENTO

**Capacidad.** La proyección de demanda de agua para la planta de tratamiento de La Loma de Quibdó se puede ver más adelante (tabla 3).

La capacidad nominal de la planta de tratamiento de La Loma, de 125 L/s, permite atender la demanda de agua de la zona centro del acueducto hasta el año 2024. Para atender la demanda de agua hasta el año 2042, se requerirá aumentar la capacidad de la planta actual en 82,4 L/s.

**Coagulación.** El resalto hidráulico se encuentra ahogado. Se considera que esta estructura debe producir un resalto hidráulico estable para realizar la mezcla rápida del coagulante con el agua.

**Tabla 3**

Demanda de agua potable en la zona centro Acueducto (1)

Año	Caudal máximo diario (L/s)	Caudal medio diario (L/s)	Caudal demandado PTAP (L/s)
2012	39,0	32,5	40,7
2017	97,5	81,3	101,6
2019	102,9	85,8	107,2
2026	124,9	104,1	130,1
2034	157,0	130,9	163,6
2042	199,1	165,9	207,4

**Floculación.** Las velocidades del agua en los orificios de interconexión y los gradientes puntuales para un caudal de 125 L/s se presentan en las tablas siguientes (tablas 4 y 5).

Se puede observar que los gradientes de velocidad oscilan entre 25 y 66 S<sup>-1</sup>, valores dentro del rango recomendado para floculación.

**Tabla 4**

Gradientes puntuales en los orificios de interconexión. Floculador izquierdo (1)

Interconexión	Sección orificio (m <sup>2</sup> )	Vel. orificio (m/s)	Sección orificio de salida (m <sup>2</sup> )	Tiempo de retención (segundos)	Pérdida de carga (m)				Gradiente s-1
					Interconexión	Codo	Salida	Total	
1 a 2	0,15	0,42	0,14	125,76	0,0142	0,0036	0,0252	0,0430	59,01
2 a 3	0,12	0,54	0,18	141,44	0,0231	0,0060	0,0145	0,0436	56,03
3 a 4	0,13	0,50	0,19	138,08	0,0196	0,0051	0,0133	0,0380	52,93
4 a 5	0,18	0,35	0,21	122,56	0,0096	0,0025	0,0106	0,0227	43,42
5 a 6	0,20	0,32	0,22	138,56	0,0079	0,0021	0,0097	0,0197	38,09
6 a 7	0,22	0,29	0,22	138,56	0,0067	0,0017	0,0101	0,0185	36,88
7 a 8	0,21	0,29	0,23	122,88	0,0069	0,0017	0,0089	0,0175	38,13
8 a 9	0,28	0,23	0,31	138,88	0,0041	0,0011	0,0048	0,0100	27,05
9 a 10	0,28	0,22	0,34	141,44	0,0039	0,0010	0,0040	0,0090	25,41
10 a 11	0,28	0,22	0,30	119,52	0,0039	0,0010	0,0052	0,0101	29,32
11 a 12	0,28	0,22	0,32	136,00	0,0040	0,0010	0,0045	0,0095	26,61

**Tabla 5**

Gradientes puntuales en los orificios de Interconexión. Floculador derecho (1)

Interconexión	Sección orificio (m <sup>2</sup> )	Vel. Orificio (m/s)	Sección orificio de salida (m <sup>2</sup> )	Tiempo de retención (segundos)	Pérdida de carga (m)				Gradiente s-1
					Interconexión	Codo	Salida	Total	
1 a 2	0,14	0,46	0,14	112,96	0,0168	0,0043	0,0252	0,0463	64,63
2 a 3	0,13	0,49	0,14	114,72	0,0190	0,0049	0,0255	0,0494	66,24
3 a 4	0,14	0,44	0,16	160,80	0,0158	0,0040	0,0194	0,0391	49,76
4 a 5	0,18	0,34	0,22	118,56	0,0091	0,0024	0,0101	0,0216	43,06
5 a 6	0,19	0,33	0,17	120,48	0,0087	0,0022	0,0173	0,0282	48,87
6 a 7	0,21	0,30	0,20	148,80	0,0073	0,0018	0,0115	0,0207	37,61
7 a 8	0,19	0,33	0,22	120,16	0,0087	0,0022	0,0101	0,0210	42,23
8 a 9	0,25	0,26	0,32	123,52	0,0052	0,0014	0,0046	0,0112	30,39
9 a 10	0,22	0,29	0,31	148,00	0,0067	0,0017	0,0050	0,0134	30,41
10 a 11	0,28	0,22	0,30	116,00	0,0040	0,0010	0,0052	0,0101	29,80
11 a 12	0,27	0,23	0,33	112,48	0,0043	0,0011	0,0043	0,0097	29,61

**Sedimentación.** A renglón seguido se presentan los resultados de la evaluación de los sedimentadores (tabla 6).

**Tabla 6**  
Condiciones de sedimentación (1)

Un	Área (m <sup>2</sup> )	Carga superficial V <sub>o</sub> (m/día)	Velocidad crítica V <sub>sc</sub> (m/día)	Número de Reynolds	Tiempo de retención (minutos)
1	23,29	178,49	23,80	129	9,68
2	20,21	205,69	27,42	148	8,40
3	22,98	180,89	24,12	130	9,55

Como se observa en la tabla anterior, los sedimentadores operan con condiciones de diseño dentro de los parámetros recomendados para sedimentación de tasa alta.

**Filtración.** Más adelante se muestran las condiciones de operación de los filtros (tabla 7).

**Tabla 7**  
Condiciones de operación de los filtros (1)

Un	Ancho (m)	Longitud (m)	Profundidad (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Vel. de lavado (m/min)	Vel. de lavado (m/día)
1	2,13	3,74	4,44	7,97	0,94	240
2	2,13	3,74	4,44	7,97	0,94	240
3	1,84	3,74	4,44	6,88	1,09	240
4	1,84	3,74	4,44	6,88	1,09	240
5	2,10	3,74	4,44	7,85	0,96	240
6	2,10	3,74	4,44	7,85	0,96	240

La velocidad de filtración promedio obtenida, 240 m/día, se encuentra dentro de los valores aceptados por las normas RAS-2000, donde se establece que la velocidad de filtración debe ser menor de 300 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-día (numeral C.7.5.1.3). Para el área total de filtración de 45,6 m<sup>2</sup> y con la velocidad máxima de filtración aceptada por las normas RAS-2000, el caudal máximo de filtración que podría tratar la estructura es de 158 L/s.

La velocidad de lavado se encuentra dentro del rango recomendado por las normas RAS-2000, que establecen un valor entre 0,6 y 0,9 m/minuto para el lavado del filtro.

**Desinfección.** En la planta de La Loma no hay cámara de contacto, por lo que debe impulsarse su construcción.

## CONCLUSIONES

- Para la demanda del año 2017, se recomienda modificar las condiciones de mezcla rápida para obtener un resalto hidráulico estable.
- El floculador tiene capacidad para abastecer la demanda hasta el año 2034, garantizando el funcionamiento hidráulico adecuado con velocidades y gradientes de mezcla del agua con valores recomendados en las normas RAS 2000.
- La zona de repartición a la zona de sedimentación ofrece condiciones de funcionamiento ideales, puesto que en ésta se generan gradientes de velocidad bajos que no producen rompimiento del floc.
- Se recomienda modificar el vertedero de salida del agua sedimentada utilizando un vertedero tipo sierra.
- El sistema de filtración ofrece velocidades de filtración dentro de los parámetros de diseño recomendados por el RAS 2000, tanto para operación como para lavado.
- La planta de La Loma suministró agua potable en el año 2015, cumpliendo con los criterios de la norma colombiana.

## REFERENCIAS

Guerrero, C.O.E. (2017, mayo). Evaluación de la PTAP del sector La Loma del Cabí, en el municipio de Quibdó. Trabajo de grado para la maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

## BIBLIOGRAFÍA

- Arboleda Valencia, J. (2005). *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá, D.C.: Editorial McGraw-Hill Interamericana.
- Chow, V. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá, D.C.: Editorial McGraw-Hill Interamericana.
- Di Bernardo, L. (2005). *Métodos e técnicas de tratamiento de aguas*. Rio de Janeiro: Editorial Rima, 2005.
- Ministerio de Desarrollo Económico (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. RAS 2000, título C. Sistemas de potabilización*.
- Pérez Parra, J. (2009). *Manual de potabilización del agua*. Medellín: Editorial Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.
- Rodríguez Díaz, A. (2009). *Hidráulica experimental*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero Rojas, J. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero Rojas, J. (2012). *Purificación del agua*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sotelo Ávila, G. (2006). *Hidráulica general*. México, D.F.: Editorial Limusa.



# Evaluación de la metodología de ensayo acelerado de barras de mortero ASTM C 1260 para detectar agregados potencialmente reactivos y las medidas de mitigación de la reacción álcali-sílice ASTM C 1567

Assessment of the ASTM C 1260 mortar bar accelerated test methodology to detect potentially reactive aggregates and the ASTM C 1567 alkali-silica reaction mitigation measures

STEFANNY BOLÍVAR MURCIA<sup>1</sup> - NANCY TORRES<sup>2</sup>

1. Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniera civil. Magíster en Estructuras y doctora en Ciencia y Tecnología de Materiales.

stefanny.bolivar-m@mail.escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 25/01/2018 Aceptado: 28/02/2018

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

## Resumen

La reacción álcali-sílice se define como un fenómeno producido por los álcalis (sodio o potasio) del cemento, los cuales reaccionan con la sílice presente en ciertos agregados, formando un gel que en condiciones de humedad genera microfisuras y esfuerzos internos. En el presente artículo se exponen los resultados de un proyecto de investigación en el que se evaluó la potencial reactividad de tres agregados del territorio colombiano en combinación con dos tipos de cementos y dos relaciones agua-cemento, con el ensayo ASTM C 1260 de barras de mortero. De las muestras reactivas, se evaluó la efectividad de materiales cementantes para mitigar la reacción álcali-sílice, en el ensayo ASTM C 1567 de barras de mortero. Finalmente se analizó el comportamiento mecánico de muestras de mortero, como la resistencia a compresión, flexión y módulo de elasticidad, respecto a probetas con agregados reactivos y no reactivos, concluyendo que la reacción álcali sílice-aumenta a medida que aumenta la relación agregado-cemento y ésta depende de la composición mineralógica de cada agregado.

Por otro lado, los materiales mitigantes utilizados, como la ceniza volante F, microsílíce y metacaolín, son competentes para reducir la reacción álcali-sílice en cierta proporción de remplazo; las propiedades mecánicas más afectadas por la reacción álcali-sílice son el módulo elástico y la resistencia a flexión, y la resistencia a compresión se ve afectada en menor porcentaje a lo largo del tiempo.

**Palabras claves:** reacción álcali-sílice, material cementante mitigante, patología.

## Abstract

The alkali-silica reaction is defined as a phenomenon produced by the alkali (sodium or potassium) of the cement, which reacts with the silica present in certain aggregates, forming a gel, which under conditions of humidity generates micro cracks and internal stresses. This paper presents the results of a research project that assessed the potential reactivity of three aggregates of the Colombian territory in combination with two cement types and two cement water ratios according with ASTM C 1260 mortar test bars. From the reactive samples, the alkali-silica reaction was assessed through the effectiveness of cementing materials.

Finally, the mechanical behavior was analyzed: the resistance to compression and flexion and elastic properties. By comparing the answers, several conclusions were reached. The alkali silica reaction increases as the aggregate-cement ratio increases, and it depends on the mineralogic composition. Mitigating materials such as fly ash F, microsílíce, and metacaolin are valid to reduce the alkali-silica reaction based on the amount of replacement. The most affected mechanical properties affected by the alkali silica reaction are elastic modulus and flexural strength; compressive strength is affected but at a lesser degree.

**Keywords:** alkali-silica reaction, cementing materials, pathology.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia se han encontrado estructuras de concreto con posible presencia de la reacción álcali-sílice (RAS), como la presa de El Cercado, sobre el río Ranchería, la presa de Ituango y la presa del río Tona. Estructuras de grandes volúmenes de concreto en las que los agregados generalmente proceden de zonas próximas a la obra, lo que puede implicar el empleo de agregados inadecuados, que con el paso del tiempo conducen a expansiones. En el 2009, Ingeominas reveló 16 puntos críticos donde hay agregados que podrían reaccionar con el concreto (tabla 1).

Osuna (2009) define la RAS como el fenómeno producido por los álcalis (sodio o potasio) del cemento, los cuales reaccionan con la sílice presente en ciertos agregados, formando un gel que en condiciones de humedad genera microfisuras y esfuerzos internos en el concreto. Se ve la necesidad de que las autoridades competentes de supervisión de obra exijan una caracterización confiable de agregados, para construir obras durables y funcionales.

Después de que se identificó la reacción álcali-sílice como la causa de muchas fallas del concreto, como agrietamientos y, en casos avanzados, grandes fisuras y descascaramiento, se encontró que el uso de adiciones minerales en remplazo parcial del cemento reduce los efectos de la RAS. Entre las adiciones para prevenir la RAS, Marval, Cline, Burke, Rollings, Sherma y Grene (2002) recomiendan utilizar ceniza volante tipo F en 40-50 % de remplazo parcial del cemento y humo de sílice en un 10 % de remplazo. En general, estas adiciones mejoran la calidad del concreto. Por lo mismo, la correcta proporción de remplazo del cemento es importante, con el fin de reducir los costos de construcción y poder utilizar efectivamente, tanto como sea posible, las fuentes de agregados reactivos.

Por otro lado, en la industria de producción de concreto hay necesidad de mejorar o modificar los procedimientos de evaluación de los agregados para una clara y confiable clasificación de éstos, en condiciones controladas, con métodos rápidos y simples. Actualmente, existen tres métodos estandarizados para la determinación de la RAS: los petrográficos, los químicos y las pruebas de expansión, los cuales se han estudiado en varios países.

En el presente artículo se evalúa, en la etapa 1, la metodología de ensayo estándar para determinar la po-

tencial reactividad álcali-sílice de los agregados (método de barras de mortero) ASTM C 1260, para clasificar agregados potencialmente reactivos de tres zonas de Colombia. Después en la etapa 2, se estudian dos de las muestras reactivas de la primera etapa, se valoran medidas de mitigación de la reacción álcali-sílice por medio del remplazo de cemento por adiciones cementantes (método acelerado de la barra de mortero) ASTM C 1567, y finalmente se hacen ensayos mecánicos, como ensayo de compresión de cilindros ASTM C 39, ensayo de flexión de vigas ASTM C78 y ensayo de módulo de elasticidad ASTM C 469, tanto a muestras reactivas como a no reactivas.

**Tabla 1**

Tabla de fuentes de agregados reactivos en Colombia

Norma técnica colombiana NTC 174 (quinta actualización)		
N.º	Terreno	Rocas fuentes de agregados
1	Garzón	Intrusivos granitoides, chamoquitas, migmatitas, granulitas, meises félsicos
2	Payandé	Intrusivos granitoides, riolitas, traquitas, andesitas, migmatitas, granulitas, neises félsicos, calizas, areniscas
3	Cajamarca	Intrusivos granitoides, neises, cuarcitas, mármoles
4	Cauca Romeral	Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos toleíticos, neises, esquistos, liditas o cherts
5	Dagua	Plutones calcoalcalinos, basaltos toleíticos, calizas, liditas o cherts
6	Cañasgordas	Basaltos pobres en <i>k</i> , liditas, calizas
7	Baudó	Liditas y calizas
8	Sinú	Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos, tobas, liditas
9	Buritaca	Plutones calcoalcalinos, andesitas, basaltos, tobas, liditas
10	San Jacinto	Calizas, liditas, areniscas calcáreas
11	San Lucas	Granitoides, lavas riolíticas y riodacitas, tobas, neises, cuarzos feldespáticos
12	Santander	Granitoides, riolitas, andesitas, neises félsicos, mármoles, calizas
13	Perijá	Granitoides, riolitas, tobas riolíticas, calizas
14	Sierra Nevada	Granitoides, riolitas, andesitas, neises félsicos, calizas
15	Baja Guajira	Riolitas, espilitas de abajo Al, esquistos félsicos, mármoles, calizas
16	Cosinas	Granitoides, flujos riodacíticos, neises félsicos, mármoles, calizas

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

### Materiales

Para el desarrollo del programa experimental se usaron tres agregados finos del territorio colombiano: Tumaco (TU), de Nariño; Tunjuelo (BO), de Bogotá, y Cemex (CE), de origen desconocido (tabla 2).

**Tabla 2**  
Composición química de agregados en estudio

Elemento o compuesto	M-Tumaco (% en peso)	XRF-5534 M-Bogotá (% en peso)	XRF-5534 M-Cemex (% en peso)
SiO <sub>2</sub>	61,98 %	91,05 %	75,56 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,36 %	6,44 %	11,96 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,08 %	0,57 %	2,75 %
CaO	6,00 %	0,25 %	2,24 %
Na <sub>2</sub> O	3,77 %	0,14 %	3,10 %
MgO	2,30 %	0,15 %	0,99 %
K <sub>2</sub> O	1,18 %	0,53 %	2,39 %
TiO <sub>2</sub>	0,69 %	0,23 %	0,31 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,18 %	0,17 %	0,15 %
MnO	0,12 %	170 ppm	0,15 %
Ba	0,12 %	0,06 %	0,10 %
SO <sub>3</sub>	0,07 %	0,30 %	0,11 %
Cl	0,03 %	0,05 %	0,05 %

**Tabla 3**  
Composición química del cemento tipo III y tipo I

Elemento o compuesto	Cemento tipo III (% en peso)	Cemento tipo I (% en peso)
CaO	61,01 %	64,1 %
SiO <sub>2</sub>	20,91 %	19,37 %
SO <sub>3</sub>	5,87 %	4,13 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,78 %	5,21 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,63 %	2,79 %
K <sub>2</sub> O	1,05 %	0,25 %
MgO	0,91 %	3,19 %
Na <sub>2</sub> O	0,68 %	0,14 %
TiO <sub>2</sub>	0,31 %	0,47 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,30 %	0,06 %
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,27 %	--
Ba	0,09 %	0,07 %
SrO	0,09 %	0,08 %
Densidad	3,08 g/cm <sup>3</sup>	2,88 g/cm <sup>3</sup>
Finura	4252 cm/g	4963 cm <sup>2</sup> /g

Igualmente, se utilizaron dos tipos de cemento: tipo I (CCOM) y tipo III (CCON). El cemento tipo I corresponde a un cemento comercial de bolsa del interior del país, de uso general, y el cemento tipo III corresponde a un tipo concretero de la misma cementera. En la tabla anterior se muestran su composición química y algunas de sus propiedades físicas (tabla 3).

Las adiciones cementantes utilizadas como medida de mitigación corresponden a metacaolín (MK) de marca Corona, ceniza volante (CV) de Termozipa y microsílíce (SF) de Toxement (tabla 4).

**Tabla 4**  
Composición química de materiales cementantes usados

Elemento o compuesto	Ceniza volante (% en peso)	Metacaolín (% en peso)	Microsílíce (% en peso)
SiO <sub>2</sub>	58,12 %	57,48 %	88,63 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,99 %	38,53 %	0,53 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,49 %	1,36 %	3,26 %
CaO	1,54 %	0,17 %	0,40 %
K <sub>2</sub> O	1,29 %	0,63 %	3,11 %
SO <sub>3</sub>	1,18 %	0,05 %	0,98 %
TiO <sub>2</sub>	1,03 %	1,28 %	0,01 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,72 %	0,03 %	0,09 %
MgO	0,56 %	0,22 %	1,67 %
Na <sub>2</sub> O	0,40 %	0,10 %	0,96 %

### Estudio experimental

La primera fase consistió en la puesta en marcha del ensayo especificado en la norma ASTM C 1260, clasificando las muestras de tal manera que si la expansión a los 14 días es menor que el 0,10 % es considerada inocua, si al día 14 la expansión está entre el 0,10 y 0,20 % es considerada inconclusa, y si la expansión a los 14 días es mayor de 0,20 % es considerada reactiva.

Se midió la expansión de barras de mortero usando tres tipos de agregados (Tunjuelo, Cemex y Tumaco), en combinación con los cementos (tipos I y III), con dos relaciones agua-cemento (A/C) 0,47 (estándar) y una variación a la norma con una relación agua-cemento de 0,60, con fines comparativos. De la misma manera, se realizaron ensayos a compresión a cubos de mortero

ASTM C 109, con curado normal y la influencia del hidróxido de sodio.

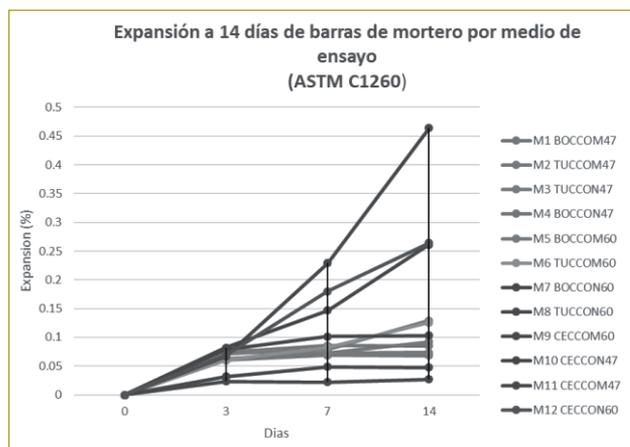
La segunda fase consistió en evaluar las combinaciones agregado-cemento que mostraron ser reactivos y se procedió a realizar el ensayo ASTM C 1567, con dos porcentajes de remplazo de los siguientes materiales mitigantes: ceniza volante, metacaolín y microsílce, midiendo la expansión de las barras de mortero a 14 días, tal como lo establece la norma, donde el criterio de aceptación de las muestras en estudio es el siguiente: si la expansión a los 14 días es menor que el 0,10 % es considerada inocua; si al día 14 la expansión está entre el 0,10 y 0,20 % es considerada inconclusa, y si la expansión a los 14 días es mayor de 0,20 % es considerada reactiva.

Se hicieron ensayos de compresión ASTM C 39 y de módulo elástico a cilindros de mortero ASTM C 469, e igualmente ensayos de flexión ASTM C 78, a las muestras reactivas, y a las muestras que contenían el mitigante más eficiente de los nombrados antes a una edad de 28 a 90 días. Por otro lado, se realizó el ensayo petrográfico a dos de las muestras que dieron reactivas en la etapa 1.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

### Determinación de la reactividad de los agregados

Posteriormente, se presenta para cada una de las 12 mezclas elaboradas en la etapa 1 las expansiones registradas a 14 días, las cuales se midieron siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C1260 (tabla 5).



**Figura 1.** Expansión según ASTM 1260 para probetas elaboradas con las mezclas de la etapa 1.

**Tabla 5**

ASTM C 1260. Expansión en porcentaje para mezclas de la etapa I

Agregado	Expansión (%)			
	0	3	7	14
BOCCOM47	0,00 %	0,06 %	0,07 %	0,07 %
BOCCON47	0,00 %	0,07 %	0,09 %	0,08 %
BOCCON60	0,00 %	0,08 %	0,10 %	0,10 %
BOCCOM60	0,00 %	0,08 %	0,07 %	0,07 %
TUCCOM60	0,00 %	0,06 %	0,08 %	0,13 %
TUCCON60	0,00 %	0,07 %	0,23 %	0,46 %
TUCCOM47	0,00 %	0,06 %	0,07 %	0,09 %
TUCCON47	0,00 %	0,07 %	0,08 %	0,13 %
CECCOM60	0,00 %	0,02 %	0,02 %	0,03 %
CECCON47	0,00 %	0,08 %	0,15 %	0,26 %
CECCOM47	0,00 %	0,03 %	0,05 %	0,05 %
CECON60	0,00 %	0,07 %	0,18 %	0,26 %

Se utilizaron los criterios de evaluación descritos anteriormente; estas mediciones se hicieron para tres especímenes de cada una de las mezclas en estudio.

Para una mejor visualización, se muestra un resumen de las expansiones presentadas a 14 días, en los especímenes de las 12 mezclas de la etapa 1, expuestas a la solución NaOH A 80 °C (figura 1).

Las combinaciones para el agregado de Tunjuelo (muestras 1, 4, 5, 7) con los dos tipos de cemento en estudio y las dos relaciones agua-cemento presentan expansiones relativamente bajas a 14 días, siendo del orden de 0,07 a 0,10 % en promedio. Mientras que las combinaciones para el agregado de Tumaco (muestras 2, 3, 6, 8) para lecturas a 14 días, las expansiones oscilan entre 0,13 y 0,46 %, indicando que este agregado es potencialmente reactivo frente a una combinación específica de a/c de 0,60. Por otro lado, para el agregado de Cemex (muestras 9, 10, 11, 12) las expansiones varían entre 0,08 a 0,26 %, indicando también una combinación potencialmente reactiva para ambos cementos en las dos relaciones de agua-cemento de 0,47 y 0,60.

### Evaluación de la eficiencia de las adiciones cementantes como control de las expansiones

Se utilizó el ensayo ASTM C 1567 para evaluar los efectos de la ceniza volante de clase F, microsílce y metacaolín, como material de control a las expansiones

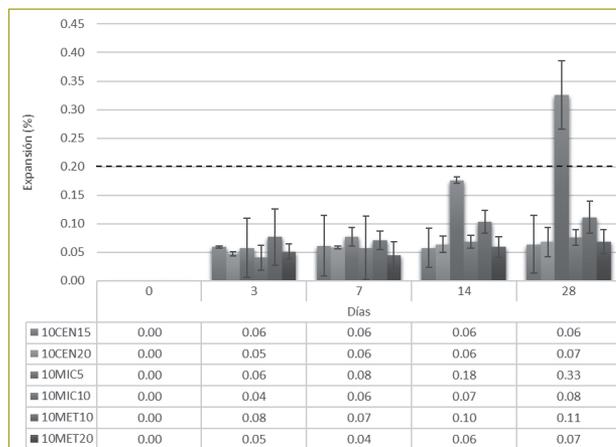
nes. Se eligieron dos combinaciones de los agregados que presentaron reactividad de la etapa 1 las mezclas 8-(TUCCON60) altamente reactivo y 10-(CCECON47) altamente reactivo. A continuación se presentan los porcentajes de remplazo de cemento evaluadas para cada una de las adiciones cementantes estudiadas (tabla 6).

**Tabla 6**  
Porcentaje de remplazo de cemento

Adición cementante	Porcentaje de remplazo en peso de cemento.
Ceniza volante	15 y 20 %
Metacaolín	5 y 10 %
Microsilíce	10 y 20 %

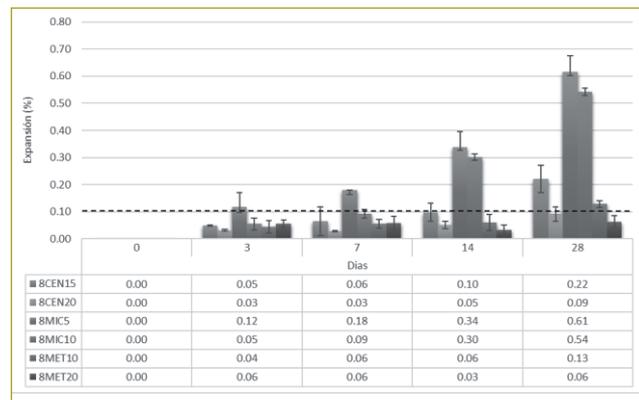
A continuación se presenta la discusión de los resultados para cada una de las mezclas elaboradas con los agregados Cemex y Tumaco, respectivamente:

Para el agregado Cemex la ceniza volante tipo F, en remplazo parcial de cemento de 15 y 20 %, disminuye la expansión entre un 82 -83 %, respectivamente. Por otro lado, un remplazo de 10 % de microsilíce reduce la expansión en un 80 % y un remplazo de metacaolín del 20 % disminuye la expansión en un 80%. Se puede concluir que los tres materiales cementantes en los rangos seleccionados para el agregado Cemex son efectivos, llegando a una reducción de expansión similar.



**Figura 2** Comparación de 28 días con mitigantes en estudio para el agregado Cemex.

Para el agregado Tumaco, la ceniza volante tipo F con un remplazo parcial de cemento tipo III en un 20 % reduce la expansión en un 87 %; de la misma manera, el metacaolín con un remplazo del 20 % disminuye la expansión en un 91 %. Con un remplazo de 10 % microsilíce, se reduce la expansión en un 90 %. De lo anterior se infiere que para la combinación de agregado Tumaco con un cemento tipo III y una relación agua- cemento de 0,60 el mejor mitigante es el metacaolín (figura 3).



**Figura 3** Comparación a 28 días con mitigantes en estudio para el agregado Tumaco.

Utilizando como criterio una expansión de 14 días de 0,10 % para medir la efectividad de las alternativas de mitigación mediante la ASTM C 1567, se hace un resumen de esta evaluación (tabla 7). Las alternativas que fueron eficaces con el agregado Tumaco fueron la ceniza volante tipo F con un remplazo de 10 % y el metacaolín con un remplazo del 10 %. Por otro lado, para el agregado Cemex fue eficaz de un 10 y 15 % de remplazo con ceniza volante tipo F, 10 % de microsilíce y 20 % de metacaolín.

Al comparar adiciones cementantes, el uso de ceniza volante tipo F, en concordancia según lo citado con Malvar et al. (2002), puede disminuir la expansión en remplazos del 20 al 25 % en peso, hasta valores de expansión menores del 0,10 %; es decir, puede reducir la reactividad de un agregado de potencialmente reactivo a inocuo.

El uso de microsilíce en remplazos del 5 al 10 % redujo la expansión para el agregado de Tumaco sin llegar a catalogarlo como inocuo; no obstante, para un

reemplazo del 10 % para el agregado Cemex se logró minimizar las expansiones a 28 días y clasificarlo como inocuo. Cabe decir que los resultados encontrados son coherentes con lo mencionado por Touma (2000) al afirmar que un reemplazo del 10 % de microsilice disminuye las expansiones en la misma cantidad que un 20 % de reemplazo con ceniza volante tipo F.

**Tabla 7**

Efectividad de alternativas de mitigación usando el criterio de 0,10 % de expansión a los 14 días.

Material cementante	Nivel de reemplazo en peso de cemento	Agregado 28 días expansión (Clasificación C1567)	
		TUCCON60	CECCON47
Ceniza volante clase F	15 %	Reactivo	Inocuo
	20 %	Inocuo	Inocuo
Microsilice	5 %	Reactivo	Reactivo
	10 %	Reactivo	Inocuo
Metacaolín	10 %	Inconcluso	Inconcluso
	20 %	Inocuo	Inocuo

El uso del metacaolín como mitigante de la reacción álcali-sílice, en un reemplazo del 20 % en peso para los agregados en estudio, disminuye las expansiones de tal manera que pueden clasificarse como inocuos. Garber et al. (2006) afirma que “El uso de metacaolín (...) aumenta la resistencia al ataque de RAS y sulfato, con un reemplazo del 10 %, aproximadamente”.

### Análisis del comportamiento mecánico

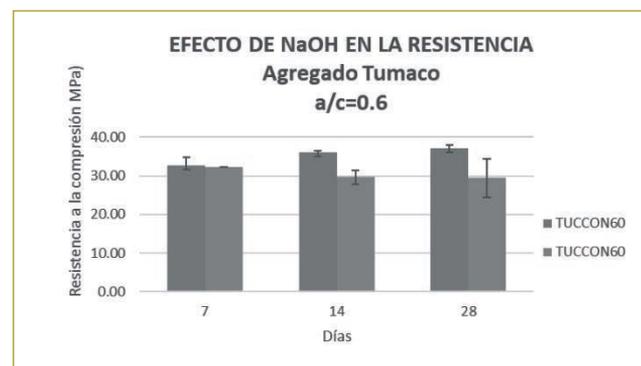
A continuación se expondrá el efecto en las propiedades mecánicas de dos de las mezclas que presentaron reactividad en la etapa 1 (TUCCON60 y CECCON47), con la evaluación de las siguientes propiedades: resistencia a la compresión, a la flexión y módulo de elasticidad, comparándolas con dos de las muestras que dieron inocuas en la etapa 1 (BOCCON60 y BOCCON47).

### Efecto del RAS en la resistencia a la compresión de cubos de mortero

Se realizó el ensayo de compresión sobre cubos de mortero para las combinaciones de mortero de la etapa 1 y

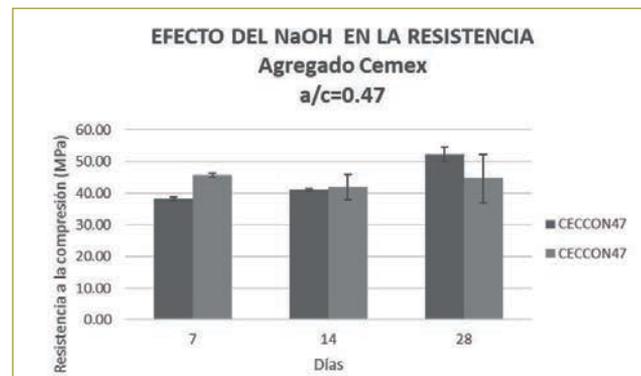
se ensayaron a 7, 14 y 28 días. La mitad de las muestras se colocaron en curado estándar a 28 días inmersas en agua y las otras en solución de NaOH.

Para el agregado Tumaco, la resistencia es similar al inicio para los dos tipos de curado evaluados (barras de color gris oscuro corresponden a las mezclas con un curado estándar, mientras que barras de color gris claro estuvieron inmersas en NaOH); posteriormente, a los 28 días ya se evidencia una pérdida de resistencia en un 20 % con respecto a las muestras con curado normal (figura 4).



**Figura 4** Comparación de resistencia a la compresión para agregado Tumaco con curado en agua y NaOH.

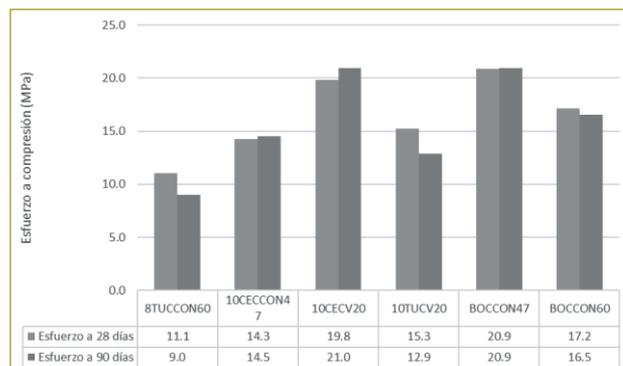
Para el agregado Cemex, se observa que las muestras con un curado estándar tienen un ascenso en la resistencia, mientras que las muestras sometidas a la solución de NaOH registran una merma de la resistencia a los 28 días y un 14 % de disminución.



**Figura 5** Comparación de resistencia a la compresión para agregado Cemex con curado en agua y NaOH.

### Efecto del RAS en la resistencia a la compresión de cilindros de mortero

Al hacer el ensayo de compresión para cilindros de mortero de 45 mm de diámetro por 90 mm de alto, para las dos muestras reactivas de la etapa I, con una muestra que no tiene alta expansión y un cilindro con un remplazo de material mitigante (ceniza volante tipo F) en la proporción encontrada como más eficaz se halló que en agregados altamente reactivos se disminuye la resistencia a compresión en un 23 % en un lapso de 28 a 90 días, mientras que en las mezclas que contenían el agregado Cemex y en combinación con su mitigante no disminuyó la resistencia a compresión. Respecto a las probetas elaboradas con adición de ceniza volante, en las que contenían el agregado altamente reactivo (TUCCON60) la adición logró mantener la resistencia a compresión en las dos edades de ensayo y en las probetas que contenían el agregado Cemex la resistencia a compresión disminuyó en un 18 % en las dos edades (figura 6).



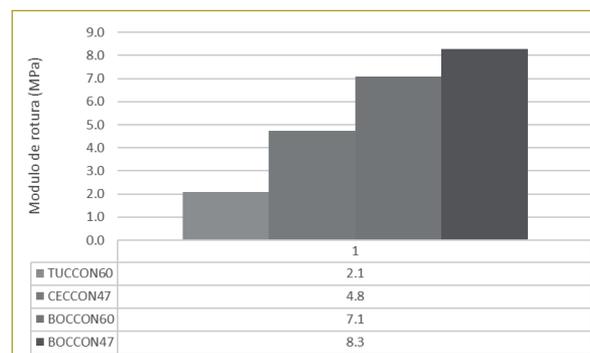
**Figura 6** Gráfica de esfuerzo a compresión para cilindros de mortero.

### Efecto del RAS en la resistencia a la flexión

Se realizó el ensayo a flexión sobre elementos prismáticos de 50 x 50 mm de sección transversal y 150 mm de longitud para las dos combinaciones usadas en la etapa II (TUCCON60 y CECCON47) y se compararon con dos muestras inocuas (BOCCON60 y CECCON47), utilizando el mismo tipo de cemento y la misma relación agua-cemento. El ensayo se hizo a 90 días, tiempo en el cual las vigas estuvieron sumergidas en NaOH a 80 °C.

A continuación se presenta el módulo de rotura, obtenido para las vigas que contenían el agregado Tumatico (TUCCON60); en éste se observa que disminuye

70 % respecto a las muestras que contenían el agregado inocuo (BOCCON60), en las mismas condiciones de exposición al NaOH. De la misma manera, para el agregado Cemex en su combinación reactiva (CECCON47), el módulo de rotura disminuye en 42 % respecto a las mezclas que contenían agregado inocuo (BOCCON47) (figura 7).



**Figura 7** Módulo de rotura para vigas de mortero a 90 días.

Estos resultados evidencian una mayor sensibilidad de la resistencia a flexión de la RAS en mezclas que contienen agregados reactivos, en comparación con la resistencia a la compresión; comportamiento que puede atribuirse principalmente a la microfisuración. Comportamiento similar al reportado por Yurtdas et al. (2013), en el que se encontró que el mortero afectado por RAS no se muestra tan sensible, en el caso de la resistencia a compresión debido al cierre de las microfisuras bajo el esfuerzo de compresión, mientras que el esfuerzo a tracción rápidamente conduce a la propagación de microfisuras. Como se puede observar en las muestras ensayadas a flexión, la muestra ya presentaba un grado alto de fisuración debido al efecto RAS (figura 8).



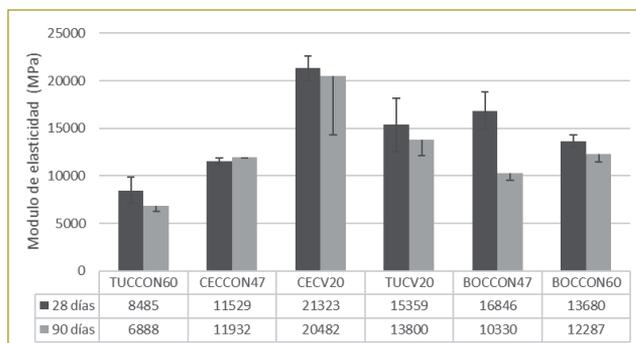
**Figura 8** Fisuración de viga de mortero debido a RAS.

### Efecto del RAS en el módulo elástico

Se evaluó el módulo de elasticidad sobre cilindros de 45 mm de diámetro y 90 mm de altura para los dos agregados en estudio de la etapa 2 (TUCCON60 y CECCON47) y se compararon con dos muestras inocuas usando el mismo tipo de cemento y la misma relación agua-cemento. El ensayo se realizó a 28 y 90 días, durante los cuales estuvieron sumergidas en NaOH a 80 °C.

Se puede observar que para el agregado Tumaco en la muestra reactiva el módulo de elasticidad disminuyó en un periodo de 28 a 90 días en un 23 % por el efecto de la RAS, mientras que la muestra con un remplazo de ceniza volante en remplazo parcial de cemento en un 20 % en peso, presentó una disminución en el módulo de elasticidad en un 11 %. Por otro lado, en comparación con un agregado inocuo en la misma combinación de agua-cemento, se observó una reducción del módulo de elasticidad de 11 % (figura 9).

A su vez, para el agregado Cemex, se observa que la muestra reactiva no muestra una disminución en el módulo de elasticidad y en la combinación con un remplazo de ceniza volante de 20 % en peso; además, se presenta una disminución del 4 % en el valor del módulo de elasticidad.



**Figura 9** Módulo de elasticidad para probetas de la etapa 2 a 28 y 90 días.

### Análisis petrográfico

Para complementar el programa experimental, se realizó un análisis petrográfico según la ASTM C 856 sobre láminas delgadas extraídas de los núcleos de las dos muestras reactivas de la etapa 1: TUCCON60 y CECCON47.

Con base en el análisis microscópico mediante sección delgada, se pudo detallar la composición interna

de los constituyentes y se encontraron agregados con características que los hacen potencialmente reactivos con los álcalis libres, como es el caso de las andesitas, basalto, tobas, cuarcitas, cherts, arcillolitas silíceas y cuarzos policristalinos. A continuación se especifica la proporción de estos agregados en cada una de las secciones estudiadas (tabla 8):

**Tabla 8**

Conteo de partículas. Informe NRB Micromatco SAS

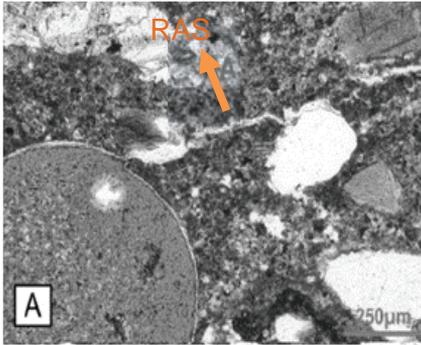
Características de los constituyentes	Muestras	
	Tumaco	Cemex
Porcentaje de partículas		
Andesita basalto	34,4	10,5
Plagioclasa	31,1	14,0
Toba	23,3	8,8
Anfibol	7,8	0,0
Fragmento alterado	2,2	0,0
Proxeno	1,1	0,0
Granito	0,0	21,9
Cuarcita	0,0	7,9
Feldespató potásico	0,0	4,4
Arcillolita silícea	0,0	0,9
Cuarzo	0,0	7,9
Esquisto	0,0	1,8
Chert	0,0	14,0
Cuarzo policristalino	0,0	3,5
Arcillolita	0,0	0,9
Arenisca fina	0,0	0,9
Limolita arcillosa	0,0	0,9
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Se observa que la composición en porcentaje de los agregados Tumaco y Cemex en los agregados reactivos están en el 58 y 46 %, respectivamente, con un porcentaje mayor de andesitas, plagioclasas y tobas en el agregado Tumaco, mientras que el de Cemex presenta una gran variedad de agregados reactivos, como el chert, cuarzo, cuarcita, andesita, basalto y plagioclasa.

Según los resultados de la petrografía se observó la presencia de microgrietas en las muestras (2,4 y 1,0 %, respectivamente), con aberturas de 0,006 a 0,08 mm, formando un patrón hexagonal, las cuales se encuentran atravesando la pasta de cemento y algunos agregados. Cabe destacar para ambos agregados la presencia del gel de reacción álcali-sílice.

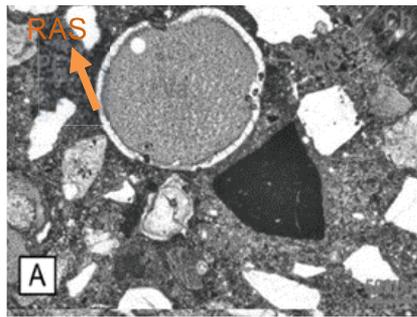
Se observa la presencia de un gel incoloro, cristalino y birrefringente, con colores de interferencia de primer

orden (gris a blanco) a segundo orden, localizado adentro de algunos vacíos y grietas en la pasta cementante. La existencia de este gel es más notoria en la muestra Tumaco.



**Figura 10**  
Microfotografías bajo el microscopio petrográfico de la muestra Tumaco evidenciando la RAS.

**Figura 11**  
Microfotografías bajo el microscopio petrográfico de la muestra Cemex evidenciando la RAS.



## CONCLUSIONES

Al evaluar la reactividad potencial de los tres agregados se encontró que al aumentar la relación  $a/c$  de la estándar (0,47) a 0,60 en su mayoría, para las combinaciones de los agregados en estudio, aumentaron la porosidad del concreto endurecido y la fluidez de la mezcla, dejando más espacio para la formación del gel. Por esto se puede concluir que la expansión se relaciona directamente con el aumento de la relación ( $a/c$ ), para las combinaciones agregado-cemento en estudio.

El material cementante más eficaz para prevenir la RAS debe estudiarse en particular para cada agregado. Como se observó, la ceniza volante, el microsílíce y el metacolín son competentes para mitigar la RAS, esto es, reducir la expansión hasta limitarlas al grado de inocuas, en diferentes proporciones de remplazo.

El uso de materiales cementantes en remplazo en proporciones adecuadas, como la ceniza volante tipo F, traen ventajas en minimizar el fenómeno de RAS, aumenta la resistencia a la compresión en un 27 % y ayuda a evitar la pérdida del módulo de elasticidad en un 50 %, para los agregados en estudio.

Al efectuar el estudio petrográfico se pudo apreciar que los agregados encontrados como reactivos (Tumaco y Cemex) contenían álcalis libres, como es el caso de las andesitas, basalto, tobas, cuacitas, cherts, arcillolitas silíceas y cuarzos policristalinos. Se puede inferir que los componentes tetraédricos del agregado Tunjuelo, aunque contenía más porcentaje de sílice, no eran inestables o sus partículas de sílice estaban incompletas, en concordancia con los resultados hallados con el ensayo ASTM C 1260 de los agregados estudiados.

Al analizar el comportamiento mecánico del mortero para las condiciones de ataque establecidas en esta investigación, se encontró que la resistencia a la compresión se ve afectada por la RAS, en una disminución de ésta de 15 a 20 % respecto a las muestras sin RAS. La disminución de resistencia a la compresión se ve más pronunciada con el paso del tiempo, es decir, que el debilitamiento de los elementos construidos con agregados reactivos va perdiendo resistencia de manera progresiva.

La RAS ocasiona una disminución del módulo de elasticidad debido a la microfisuración, y de manera significativa en agregados altamente reactivos, presentan una pérdida de rigidez y tenacidad en las secciones diseñadas inicialmente.

**Nota:** Los resultados son aplicables sólo para las variables de estudio de este artículo y serán aplicables según el criterio del profesional que los aplique.

## REFERENCIAS

- ASTM C 294 (2005). Standard descriptive nomenclature for constituents of concrete aggregates. The American Society for Testing and Materials, Annual Book of ASTM Standards: 10 pp.
- ASTM C1567-13 (s.f.). Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM C305-14 (2014). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM C1260-14 (2014). Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM C109 / C109M-16a (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- ASTM C109 / C109M-16a (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using

2-in. or [50-mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, [www.astm.org](http://www.astm.org).  
ASTM C39 (2016). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society for Testing and Materials*, 1–7. <http://doi.org/10.1520/C0039>.  
ASTM (2014). ASTM C469/C469M-14 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *ASTM International*, 1–5. <http://doi.org/10.1520/C0469>.  
Garber, S., Ideker, J., Ley, T., Williams, S., Juenger, M., Fournier, B., & Thomas, M. D. (2006). Technical Report Documentation Page Form DOT F 1700. 7 (8-72). Reproduction of completed page authorized, 7.

Malvar, L. J., Cline, G. D., Burke, D. F., Rollings, R., Sherman, T. W., & Greene, J. L. (2002). Alkali Silica Reaction Mitigation: State of the Art and Recommendations, (99).  
Osuna Vargas, M.A. (2009). Previniendo el "cáncer" del concreto. *Construdata* ISSN 2322-6552.  
Touma, W. E. (2000). Reaction in Portland Cement Concrete: Testing Methods and Mitigation, 1–556.  
Yurtdas, I., Chen, D., Hu, D. W., & Shao, J. F. (2013). Influence of alkali silica reaction (ASR) on mechanical properties of mortar. *Construction and Building Materials*, 47, 165–174. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.046>.

# Métodos de análisis y diseño para la resolución de problemas de estabilidad de taludes y excavaciones mediante técnicas de *soil nailing*

Analysis and design methods for problem-solving of slope and excavation stability through soil nailing techniques

CARLOS GERMÁN NIÑO MARTÍNEZ<sup>1</sup> - CARLOS EDUARDO RODRÍGUEZ PINEDA<sup>2</sup>

1. Magister en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia, M.Sc. y Ph.D., profesor universitario, y consultor e investigador en geotecnia.

carlos.nino-m@escuelaing.edu.co - cerodriguezpi@unal.edu.co

Recibido: 28/01/2018 Aceptado: 01/03/2018

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

## Resumen

En este artículo se presentan los resultados de un estudio de los principales aspectos que inciden en el comportamiento de las estructuras de *soil nailing* (suelo claveteado), la interacción entre los elementos principales del sistema, sus variables de comportamiento y su contribución a la estabilidad global del sistema. Se analizaron cuatro tipos de suelo de la ciudad de Bogotá: arcillas duras, arcillas blandas, arenas densas y arenas sueltas (esta clasificación rige para los suelos estudiados en la presente investigación). Para la caracterización de los materiales se utilizaron los resultados de los ensayos de campo y laboratorio de los estudios de suelos para las fases I y II del metro. Se hicieron modelos en los programas de equilibrio límite SNAP-2 y Slide, y en el programa de elementos finitos RS2.

**Palabras claves:** *soil nailing* (suelo claveteado), elementos finitos, modelaciones, estructuras de contención, excavaciones, anclajes pasivos, interacción suelo-*nail* (clavo).

## Abstract

This paper presents the results of a study about the main aspects that affect the behavior of soil nailing structures, the interaction between the main elements of the system, its behavioral variables, and its contribution to the overall stability of the system. Four types of Bogota city soil, hard clays, soft clays, dense sands, and loose sands, were analyzed (this classification applies for the soils studied in the present investigation). For characterizing the materials, the results of the field and laboratory tests of the soil studies for phases I and II of the elevated railway were used. We performed models in the equilibrium programs SNAP-2 and Slide, and in the finite element program RS2.

**Keywords:** soil nailing, finite element, numerical modelling, retaining structures, excavations, passive anchors, soil-nail interaction.

## INTRODUCCIÓN

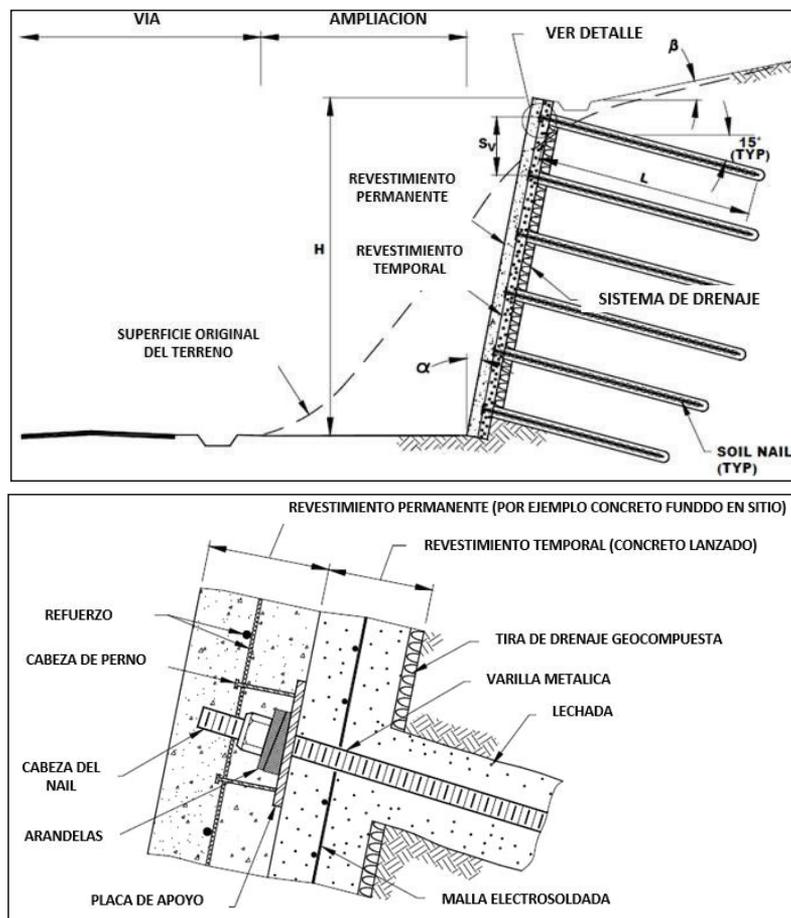
Las técnicas de *soil nailing* (suelo claveteado) representan una alternativa económica y rápida para la estabilización de taludes y excavaciones en un terreno con ciertas condiciones. Tienen un uso extensivo en muchos países de Europa, Norteamérica y Asia, y a lo largo del tiempo han demostrado un buen comportamiento en condiciones estáticas y sísmicas. Teniendo presente esto, es importante para el país incentivar el uso de tales técnicas en proyectos en los cuales pueden ser útiles y generar beneficios económicos para las entidades encargadas de ejecutarlos. No obstante, antes de hacer un uso extensivo de dichas técnicas, es necesario entender el comportamiento de los sistemas, los componentes del sistema y su interacción con el suelo, de tal manera que se logre aprovechar al máximo las ventajas que ofrecen las técnicas de *soil nailing*.

## Descripción del sistema

El sistema *soil nailing* (suelo claveteado) es una técnica que consiste en reforzar el suelo *in situ* mediante la instalación de barras pasivas paralelas, denominadas *nails* (clavos), normalmente con algún grado de inclinación hacia abajo con respecto a la horizontal. Éstos trabajan principalmente en tracción, y algunas veces en flexión y cortante. La fricción entre el suelo y el *nail* (clavo) pone los *nails* en tensión<sup>1</sup>.

## Componentes del sistema

A renglón seguido se observan los componentes de un sistema de *soil nailing* (figura 1).



**Figura 1.** Detalle de los componentes básicos de un sistema de *soil nailing* (tomado de *Geotechnical Engineering*, circular N.º 7, Soil Nail Walls).

1. French National Research Project Clouterre Soil Nailing Recommendations, 1991, p. 1.

### Proceso constructivo

La secuencia de construcción comprende, en esencia, los siguientes pasos (Lazarte et al., 2003):

**Paso 1.** Excavación. La excavación inicial se lleva a cabo a una profundidad para la cual su cara tiene la capacidad de permanecer no soportada por un corto periodo de tiempo, normalmente de 24 a 48 horas. La profundidad de la excavación está, por lo general, entre 1 y 2 m y ligeramente por debajo de la elevación donde se instalarán las varillas. La anchura de la plataforma o banco excavado debe ser suficiente para proporcionar acceso al equipo de la instalación. Durante la fase de excavación el suelo debe permanecer estable, lo cual requiere algún grado de cohesión a corto plazo.

**Paso 2.** Perforación. Los barrenos son perforados a una longitud específica, diámetro, inclinación y distancia horizontal desde la plataforma.

**Paso 3.** Instalación de varillas e inyección de lechada. Las varillas se colocan en las perforaciones. Los centralizadores se ponen alrededor de las varillas antes de la inserción, para ayudar a mantener la alineación en el agujero y permitir una adecuada cobertura de la lechada sobre las varillas. Al mismo tiempo, se inserta en el orificio el tubo de suministro de lechada. Cuando los requisitos de protección contra la corrosión son altos, también puede emplearse revestimiento de plástico corrugado para proporcionar un nivel adicional de protección contra la corrosión. La perforación se llena con lechada de cemento a través de la tubería de inyección. La lechada se coloca comúnmente a baja presión. Si se utilizan barras autoperforantes huecas, la perforación y la inyección se llevan a cabo en una sola operación.

Antes del paso 4, se instalan tiras de drenaje geocompuestas en el frente de excavación, aproximadamente en la mitad del espaciamiento entre cada conjunto de varillas adyacentes. Las tiras de drenaje se desenrollan a la siguiente elevación de la pared; éstas se extienden hasta el fondo de la excavación, donde el agua recogida se transporta a través de un drenaje en el talón del *soil nail*.

**Paso 4.** Construcción de revestimiento temporal de concreto lanzado. Un sistema de revestimiento temporal se construye entonces para soportar la sección de suelo a cielo abierto, antes de excavar el siguiente tramo de suelo. El revestimiento temporal consiste por lo general en una capa de concreto lanzado ligeramente armado, casi siempre de 100 mm de espesor. El refuerzo normalmente se compone de malla electrosoldada, que se

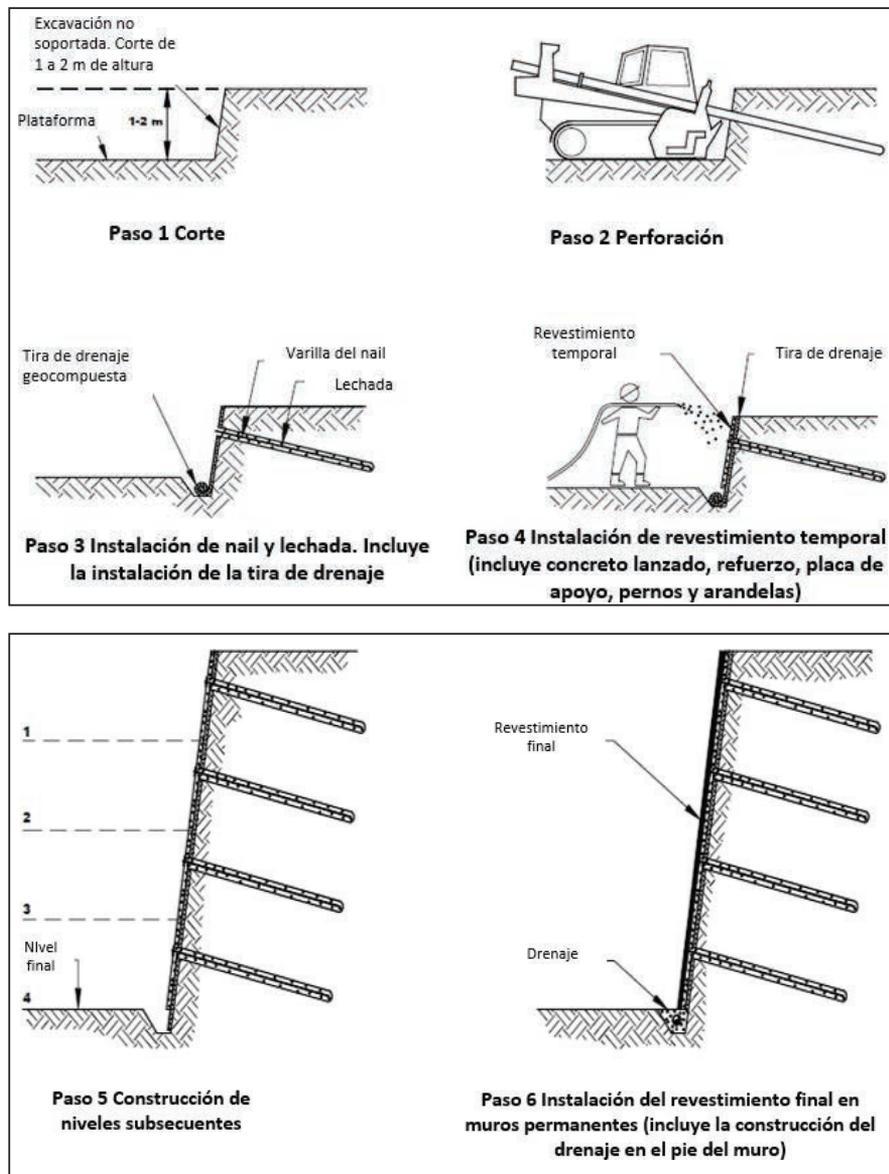
coloca más o menos a la mitad del espesor de revestimiento (figura 1, parte inferior). La longitud de la malla electrosoldada debe ser tal que permita que al menos una célula de malla completa se traslape con paneles posteriores. Después de un tiempo de curado adecuado para el revestimiento temporal, se pone una placa de apoyo de acero sobre la cabeza del *nail* que sobresale de la perforación. La barra es entonces presionada ligeramente en la primera capa de concreto lanzado fresco.

La tuerca hexagonal y las arandelas se instalan posteriormente para asegurar la cabeza del *nail* contra la placa de apoyo. La tuerca hexagonal se aprieta a un par mínimo requerido después de que el revestimiento temporal se ha curado lo suficiente. Esto, por lo general, requiere un mínimo de 24 horas. Si es necesario, se hacen las pruebas de los *nails* instalados para medir deflexiones, en tanto que las pruebas de capacidad de carga se pueden realizar antes de proceder con la siguiente excavación. Antes de hacer excavaciones posteriores, el concreto lanzado debe haberse curado durante al menos 72 horas o haber alcanzado al menos tres días de resistencia a la compresión especificada (generalmente, 10,5 MPa).

**Paso 5.** Construcción de niveles posteriores. Los pasos 1 a 4 se repiten para los niveles de excavación restantes. En cada nivel de excavación, la tira de drenaje vertical se desenrolla hacia abajo a la elevación posterior. Un nuevo panel de malla electrosoldada se coloca traslapando al menos una célula de malla completa. El concreto lanzado se continúa con una junta fría, con el nivel de concreto lanzado antes. En la parte inferior de la excavación, la tira de drenaje está conectada a un desagüe en la base del talud.

**Paso 6.** Construcción del revestimiento permanente final. Después de que se alcanza el fondo de la excavación, se instalan los *nails* y se realizan las pruebas de carga, se puede construir el revestimiento final, el cual puede consistir en hormigón armado fundido *in situ*, hormigón proyectado, o paneles prefabricados. El refuerzo del revestimiento permanente son barras de acero de refuerzo convencionales o malla electrosoldada. En el revestimiento permanente se deben evitar las juntas horizontales en la medida de lo posible<sup>2</sup>.

2. HWA. *Geotechnical Engineering*, circular N.º 7, Soil Nail Walls. FHWA-IF-03-017. March 2003, p. 7.



**Figura 2.** Secuencia típica de construcción de un sistema de *soil nailing* (tomado de *Geotechnical Engineering*, circular N.º 7, Soil Nail Walls).

### Trabajo de investigación

En este estudio se modelaron muros de 2,0 a 10,0 m de altura. Se hicieron modelos con espaciamientos entre *nails* de 1,0 m, 1,5 m y 2,0 m, debido a que la práctica usual de construcción de este tipo de sistemas se limita a espaciamientos entre 1,0 y 2,0 m. Para determinar la contribución de cada elemento del sistema se hicieron análisis de sensibilidad, variando las propiedades de cada elemento de tal forma que se pudieran observar los efectos de dichas variaciones. También se hicieron

modelos con diferentes longitudes y diámetros de *nails* para analizar los efectos sobre los factores de seguridad y las fuerzas en el revestimiento. Se realizaron análisis comparativos del factor de seguridad con el sistema y sin el sistema, para verificar cuál era su contribución a la estabilidad de los taludes y excavaciones. Finalmente, se hicieron análisis para determinar cuáles eran los parámetros de mayor incidencia en el comportamiento del sistema.

**Tabla 1**  
Variables de comportamiento

Suelo	$\gamma'_s$	$\phi'$	$c'$	$q_u$	$N_c$	$N_q$	$N_\gamma$	$E$	$\nu$
	kN/m <sup>3</sup>	°	kPa	kPa	-	-	-	MPa	-
Arcilla dura	18,41	27	29	103	23,94	13,20	14,47	260,65	0,375
Arcilla blanda	18,10	27	26	44	23,94	13,20	14,47	165,00	0,376
Arena densa	19,57	42	15	137	93,71	85,37	155,54	329,5	0,379
Arena suelta	19,91	31	15	100	32,67	20,63	25,99	174	0,377

La investigación se limitó a cuatro tipos de suelo de la ciudad de Bogotá. También se limitó la geometría de los muros, ya que el objetivo principal no era hacer cartas de diseño generales sino analizar los principales elementos del sistema y su influencia. En los análisis no se tuvieron en cuenta taludes inclinados detrás del muro o condiciones de nivel freático, condiciones sísmicas, inclinaciones de los *nails* o muros inclinados.

Se obtuvieron hallazgos interesantes en relación con la influencia de las propiedades de resistencia al corte de los suelos, la longitud de los *nails* o la presencia del revestimiento sobre el factor de seguridad. Se presenta el procedimiento para el diseño y análisis de estructuras.

El objetivo de la investigación era definir una metodología de análisis para la solución de problemas de estabilización de taludes y excavaciones mediante sistemas de *soil nailing*.

## METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Se realizaron dos tipos de modelos: de equilibrio límite (SNAP-2 y Slide) y de elementos finitos (RS2). Para llevar a cabo el análisis, se siguió este procedimiento:

- Definición de las variables principales de comportamiento.

- Delimitación del análisis y modelación.
- Modelación en SNAP-2.
- Modelación en RS2.
- Modelación en Slide.
- Análisis de resultados.
- Diseño del revestimiento.

Se aclara que la clasificación establecida en la tabla 1 es aplicable únicamente a los suelos estudiados en la presente investigación.

Para la delimitación de las modelaciones se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- Suelos: arcillas y arenas de la zona sur de la ciudad de Bogotá.
- Geometría: muros verticales de entre 2,0 m y 10,0 m de altura, con espaciamientos de 1,0, 1,50 y 2,0 m.
- Sobrecarga: 50 kPa, 40 kPa, 30 kPa y 20 kPa.
- *Nails*: diámetro de perforación de 100 mm y diámetro de refuerzo de 25 mm.
- Métodos: equilibrio límite y elementos finitos.
- Análisis de sensibilidad: se hicieron modificaciones en diferentes parámetros para analizar los efectos de éstas sobre el comportamiento del sistema.

Procedimiento de modelación  
Modelos en SNAP-2

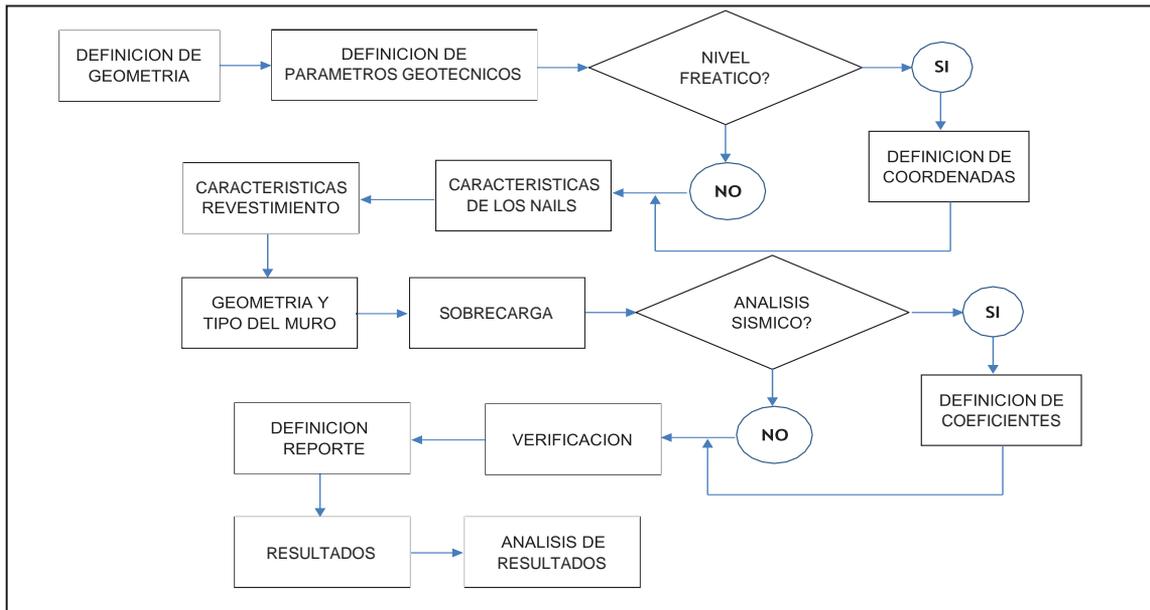


Figura 3. Procedimiento de modelación en SNAP-2.

Modelos en RS2

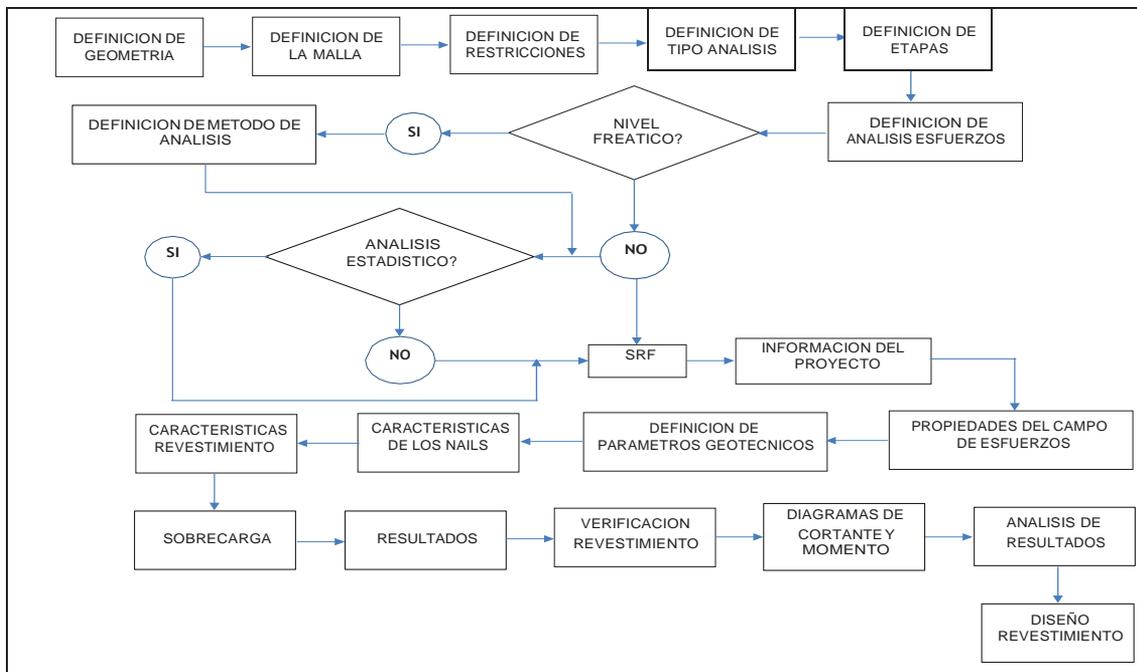


Figura 4. Procedimiento de modelación en RS2.

## Modelos en Slide

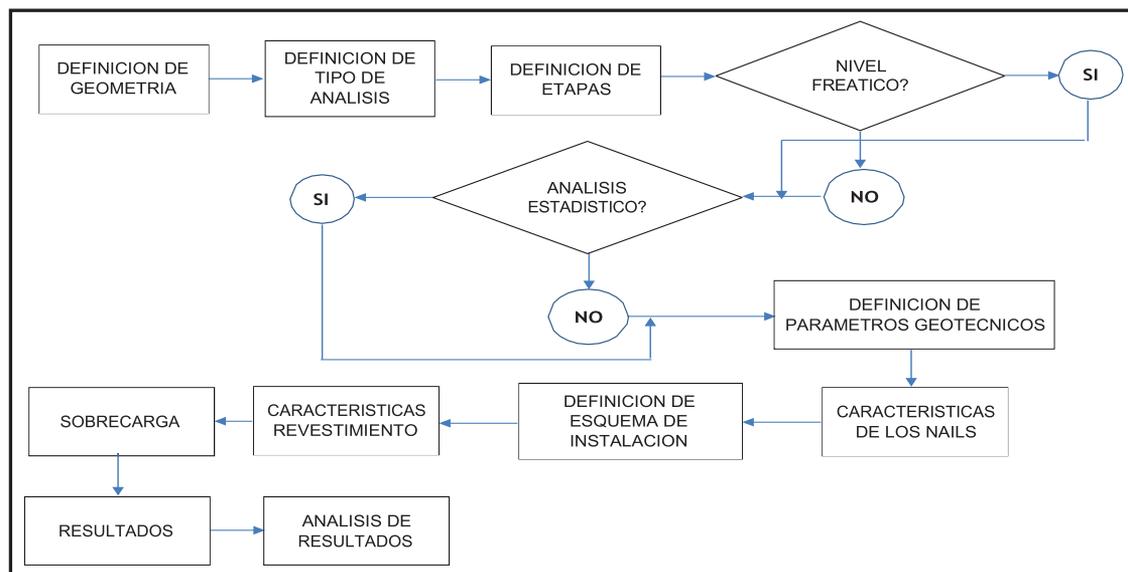


Figura 5. Procedimiento de modelación en Slide.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se evaluaron las siguientes características del sistema:

1. Influencia de los factores que se involucran en el diseño (tipo de suelo, longitud del *nail*, adherencia, diámetro de la perforación, diámetro del *nail*, revestimiento, interacción suelo-*nail*).

Tabla 2

Comparación de resultados en el factor de seguridad en la misma etapa constructiva para muros de varias alturas, con revestimiento, y espaciamiento 1,5 x 1,5, mediante un análisis en RS2

Tipo de análisis	H muro (m)	Long Nail (m)	Etapas constructiva (h = 4,50 m)	FS en la etapa analizada
RS2	4,50	3,15	Revestimiento 3	2,59
RS2	6,00	4,20	Revestimiento 3	2,87
RS2	7,50	5,25	Revestimiento 3	2,87
RS2	9,0	6,30	Revestimiento 3	3,34

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos.

### Longitud de los *nails*

En todos los análisis efectuados se encontró que la longitud del *nail* tiene una influencia significativa en el factor de seguridad. A mayor longitud de *nail*, mayor factor de seguridad global. En los modelos elaborados en RS2 se observó que para un aumento de la longitud del *nail* de un 100 %, se podían obtener aumentos en el factor de seguridad global cercanos al 30 %. Esto indica que en ocasiones es posible recurrir a la modificación en la longitud del *nail* para aumentar el factor de seguridad global.

### Adherencia suelo-*nail*

De los modelos realizados en Slide se obtuvo que la adherencia tiene una gran influencia en el aumento o disminución del factor de seguridad global. Es decir, se encontró que hasta ciertos valores límite, al aumentar la adherencia, también aumentaba el factor de seguridad global. Después de este valor límite, al aumentar la adherencia el factor de seguridad puede permanecer constante o incluso disminuir por los efectos sobre el revestimiento, ya que a mayor adherencia, también son mayores las fuerzas sobre el revestimiento. El revestimiento puede fallar y generarse superficies de falla cerca del frente de excavación. Esto indica que la adherencia

**Tabla 3**

Comparación de resultados en el factor de seguridad y otros parámetros para un muro de 9 m de altura y espaciamientos de 1,5 x 1,5, en arena suelta, mediante un análisis en RS2

Parámetro	Diámetro de la lechada para una varilla de 25,4 mm de diámetro			
	75 mm	100 mm	200 mm	300 mm
Módulo de Young equivalente (Eq) (kPa)	46.842.254	38.161.268	29.790.254	28.240.141
Factor de seguridad	1,39	1,39	1,30	1,02
% variación FS	-	0%	-6,47	-21,54 %
Deformaciones cortantes máximas	0,065	0,063	0,045	0,054
Desplazamientos laterales máximos	0,0071	0,006	0,003	0,0003
Fuerzas máximas cabeza <i>nail</i> (kN)	119	120	128	97
Fuerzas máximas <i>nail</i> (kN)	139	142	145	128
Desplazamientos verticales máximos (m)	0,0076	0,0062	0,0045	0,0005
Movimiento máximo en el revestimiento (kN-m)	18	18	18	10
Cortante máximo en el revestimiento (kN)	64	65	69	53
Deformaciones volumétricas máximas	0,0015	0,0015	0,0018	0,0018

no es el único factor que influye, sino que está también acompañada de la rigidez del revestimiento.

### Diámetro de la perforación

Se encontró en los modelos en RS2 que al aumentar el diámetro de la perforación, los factores de seguridad disminuyen. Esto es especialmente importante en los modelos realizados en arenas, donde se encontraron disminuciones muy significativas (tabla 3).

La razón de la disminución en el factor de seguridad está relacionada con la forma como se realiza el modelo. En un modelo de elementos finitos de dos dimensiones, el programa asume el *nail* como una placa continua de un ancho fijo; en otras palabras, en el modelo, esta placa siempre tiene el mismo ancho, o sea, que al aumentar el diámetro de la perforación el ancho no varía, sólo varía la altura. Por lo tanto, el área de contacto suelo-*nail* siempre será la misma. Adicionalmente, si se aumenta el diámetro (es decir, la altura de la placa), se debe disminuir la rigidez equivalente del *nail*, para simular el cambio en el diámetro de la lechada pero dejando constante el diámetro de la varilla de refuerzo.

No obstante lo anterior, sí se puede observar la tendencia general a una disminución en los desplazamientos y deformaciones, así como en las fuerzas en los *nails* y en el revestimiento al aumentar el diámetro de la perforación en el modelo; esto se debe a que aunque el *nail* tiene una menor rigidez, el conjunto suelo-*nail* sí tiene una mayor rigidez.

### Efecto del revestimiento

El revestimiento tiene una influencia muy significativa en el factor de seguridad global. En la siguiente tabla se pueden observar los resultados de varios análisis realizados en RS2 (tabla 4):

**Tabla 4**

Comparación de resultados en el factor de seguridad para varios muros de 9 m de altura y espaciamientos de 1,5 x 1,5, mediante un análisis en RS2

Análisis	Material	Altura muro (m)	FS con revestimiento	FS sin revestimiento	% Variación
RS2	Arena suelta	9,0	1,44	1,15	-20,71 %
RS2	Arena densa	9,0	1,98	1,36	-31,31 %
RS2	Arcilla blanda	9,0	1,57	1,47	-6,37 %
RS2	Arcilla dura	9,0	1,63	1,53	-6,14 %

Se observa en la anterior tabla que en los suelos arenosos la influencia del revestimiento es mucho mayor que en los suelos arcillosos analizados en la presente investigación.

### Interacción suelo-*nail*

En este punto se destaca la importancia de los parámetros de resistencia del suelo. Se encontró que el principal parámetro de comportamiento es el ángulo de fricción. Obviamente, este parámetro tiene una relación directa

Tabla 5

Comparación de los factores de seguridad en función de los parámetros geomecánicos del suelo para un muro de 7,50 m con espaciamientos de 1,50 x 1,50, mediante un análisis en RS2

SUELO	$\phi'$	% Variación	C'	% Variación	FS	% Variación
ARENA SUELTA	31		15		1,51	
		35%		0%		37%
ARENA DENSA	42		15		2,07	
SUELO	$\phi'$	% Variación	C'	% Variación	FS	% Variación
ARCILLABLANDA	27		26		1,65	
		0%		12%		4%
ARCILLA DURA	27		29		1,72	
SUELO	$\phi'$	% Variación	C'	% Variación	FS	% Variación
ARENA DENSA	42		15		2,07	
		-36%		93%		-17%
ARCILLA DURA	27		29		1,72	
SUELO	$\phi'$	% Variación	C'	% Variación	FS	% Variación
ARENA SUELTA	31		15		1,51	
		-13%		73%		9%
ARCILLABLANDA	27		26		1,65	

con la adherencia entre el suelo y la lechada de cemento. En la siguiente tabla se presenta este análisis (tabla 5).

- La contribución del sistema de *soil nailing* en la estabilidad de un talud (modelos con sistema y sin él, resultados entre los diferentes modelos, efecto de la sobrecarga).

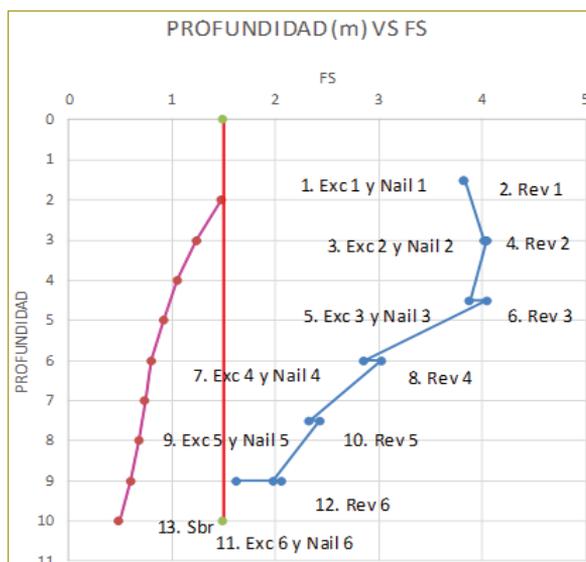


Figura 6. Comparación de los resultados del factor de seguridad obtenido sin el sistema y con el sistema, para arcillas duras, mediante modelos en RS2.

En la tabla siguiente se presenta la comparación de resultados de los factores de seguridad global de excavaciones sin el sistema de reforzamiento de *soil nailing* y los resultados, incluyendo el reforzamiento (tabla 6).

En esta figura se observan los resultados de la modelación sin la inclusión del sistema de reforzamiento en la parte izquierda, en los cuales todos los valores del FS están por debajo del valor de referencia de 1,50. A la derecha se observan los resultados del modelo una vez que se incluye el sistema de reforzamiento. En todas las etapas, el FS está por encima de 1,50.

- La contribución del revestimiento temporal y permanente al sostenimiento de una excavación (efecto del revestimiento temporal sobre el comportamiento del sistema, efecto del revestimiento definitivo sobre el comportamiento del sistema, efecto de la sobrecarga en las fuerzas en la cabeza del *nail*).

El revestimiento temporal tiene una influencia muy significativa en el comportamiento de todo el sistema, tal como puede verse en los resultados que aparecen en la tabla siguiente (tabla 6).

En el caso citado se necesita el revestimiento temporal para aumentar el factor de seguridad global hasta un valor mínimo requerido. También se observa que el revestimiento no influye solamente en el factor de seguridad sino en la disminución de

**Tabla 6**

Comparación de resultados de diferentes variables para un muro de 9,0 m en arena suelta con revestimiento temporal y sin revestimiento temporal, mediante un análisis en RS2

Constr.	FS	Máx. def. cortante	Máx. despl. horizontal (m)	Máx. despl. vertical (m)	Máx. despl. total (m)	Máx. def. volumétrica	Fuerza <i>nail</i> 1 (kN)	Fuerza máx. <i>nail</i> (kN)
Con revestimiento	1,44	0,025	0,00841	0,00824	0,0101	0,00131	28	117
Sin revestimiento	1,15	0,045	0,02315	0,02386	0,0332	0,00150	3	7
% de variación	-20 %	80 %	175 %	190 %	229 %	15 %	-89 %	-94 %

deformaciones y desplazamientos, así como en las fuerzas en los *nails*.

Respecto a la contribución del revestimiento definitivo, se encontró que no tiene ninguna influencia en el factor de seguridad global ni en los parámetros de comportamiento. En la siguiente tabla se puede observar este resultado (tabla 7):

**Tabla 7**

Comparación de resultados de diferentes variables para un muro de 9,0 m en arena suelta, incluyendo el revestimiento definitivo, mediante un análisis en SNAP-2

Parámetro	Sin revestimiento definitivo	Con revestimiento definitivo	% de variación
Fuerza cabeza <i>nail</i> (kN)	47	47	0 %
Resistencia admisible en la cabeza del <i>nail</i>	46	46	0 %
Resistencia del concreto al punzonamiento (kN)	167	167	0 %
Resistencia disponible a la flexión en la cabeza (kN)	46	46	0 %
Resistencia disponible al punzonamiento en la cabeza (kN)	141	141	0 %
Factor de seguridad en etapas intermedias (etapa 9)	2,24	2,07	-7 %
Factor de seguridad en la etapa final	1,81	1,81	0 %

Esto se debe a que el revestimiento definitivo no participa en el mecanismo de transferencia de carga. El terreno transmite la carga a los *nails*, los *nails* transmiten carga a la cabeza del *nail*, la cabeza del *nail* transmite carga a la placa de apoyo y la placa de apoyo transmite carga al revestimiento temporal, generando fuerzas de corte sobre éste. El revestimiento definitivo se coloca

para dar continuidad estructural y durabilidad a largo plazo.

### CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones de la investigación:

- El factor de seguridad y el esquema de diseño de un sistema de *soil nailing* dependen directamente de los parámetros  $c'$  y  $\phi'$ .
- El parámetro  $\phi'$  es el de mayor influencia en el factor de seguridad.
- A mayor longitud de los *nails*, mayor es el factor de seguridad.
- La adherencia suelo-*nail* tiene una influencia significativa en el factor de seguridad.
- El revestimiento es el elemento que tiene mayor influencia en la estabilidad del sistema.
- Cuanto mayor sea la sobrecarga, menor es el factor de seguridad.
- A mayor profundidad, menor influencia de la sobrecarga.
- Sin la implementación del sistema, todas las excavaciones tienen factores de seguridad menores de 1,50.
- El revestimiento temporal produce un incremento significativo del factor de seguridad en cualquier etapa de construcción.
- La inclusión del sistema de *soil nailing* aumenta el factor de seguridad entre 130 y 190 %.
- La inclusión del revestimiento temporal aumenta los factores de seguridad de manera significativa y disminuye los desplazamientos y deformaciones del sistema.
- El revestimiento definitivo no tiene influencia en el comportamiento del sistema.

- El valor de la sobrecarga influye de modo significativo en las fuerzas de cortante y momento sobre el revestimiento.

Se aclara que las conclusiones obtenidas son válidas y aplicables para los suelos estudiados en la presente investigación y no se pueden generalizar para todos los tipos de arenas y arcillas que se pueden encontrar en el medio geológico local o regional.

## REFERENCIAS

- Clouterre Project (1991). French National Research Project Clouterre. *Soil Nailing Recommendations*. Publication FHWA-SA-93-026. Washington: Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Lazarte, C., Elías, V., Espinoza, D., Sabatini, P. (2003). *Geotechnical Engineering*, circular N.º 7, Soil Nail Walls. Publication FHWA-IF-03-017. Washington: U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.



# 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)