

- **Enfermedad holandesa: incumplimiento de la proporción de los factores.**
- **Eficiencia de un tratamiento fisicoquímico en aguas residuales de una industria de productos lácteos.**
- **Análisis simplificado de oxígeno disuelto en el río Ubaté.**
- **Ajuste a los parámetros de resistencia de depósitos de coluviones mediante correlaciones entre ensayos de laboratorio, exploración geotécnica y retrocálculo.**
- **Caracterización sísmica de fallas colombianas por analogía con fallas conocidas geológica y sismológicamente.**
- **Energía de fractura en modo I del concreto de resistencia normal reforzado con fibras cortas de acero.**
- **Las mallas computacionales en ámbitos organizacionales.**



## CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**PRESIDENTE** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS

**VOCALES** MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ  
SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ  
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI  
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ  
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS  
EDUARDO SILVA SÁNCHEZ  
JAIRO URIBE ESCAMILLA  
OSWALDO CASTILLO NAVETTY  
(representante de los profesores)  
JUAN ENRIQUE ALONSO BAUTISTA  
(representante de los estudiantes)

**RECTOR** ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ

**SECRETARIO** RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

## REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**DIRECTOR** JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

**COMITÉ EDITORIAL** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS  
CLAUDIA RÍOS REYES  
PAULA XIMENA RÍOS REYES  
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ  
RICARDO SALAZAR FERRO  
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

**DIRECCIÓN EDITORIAL** CRISTINA SALAZAR PERDOMO

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

**DIRECCIÓN COMERCIAL** EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

Versión digital disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

AUTOPISTA NORTE Ak 45 N.º 205-59  
TEL.: (57-1) 668 3600, EXT. 533  
[revista@escuelaing.edu.co](mailto:revista@escuelaing.edu.co)  
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

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



# Contenido

## 5 / EDITORIAL

### ¿Es una opción rendirnos ante la corrupción?

*Paula Ximena Ríos Reyes*

## 7-14

### Enfermedad holandesa: incumplimiento de la proporción de los factores

*Eduardo Sarmiento Palacio*

En la ortodoxia se considera que la presencia de recursos naturales no afecta significativamente el funcionamiento de las economías de mercado. La percepción es refutada con la expansión de las exportaciones de alimentos en Argentina en el siglo pasado y ahora con el petróleo en Venezuela.

## 15-20

### Eficiencia de un tratamiento fisicoquímico en aguas residuales de una industria de productos lácteos

*Édison Leandro García Ospina y Jairo Alberto Romero Rojas*

En este artículo se compendian los resultados de eficiencia de remoción en DQO, DBO, SST y G y A en aguas residuales de una industria lechera, aplicando cuatro opciones de tratamiento fisicoquímico.

## 21-25

### Análisis simplificado de oxígeno disuelto en el río Ubaté

*Felipe Santamaría Alzate y Jairo Alberto Romero Rojas*

En este artículo se presentan los resultados de la modelación de OD y DBO para el río Ubaté, con base en una campaña de muestreo del año 2009 y en la formulación de tres escenarios de carga contaminante.

## 27-36

### Ajuste a los parámetros de resistencia de depósitos de coluviones mediante correlaciones entre ensayos de laboratorio, exploración geotécnica y retrocálculo

*Juan Carlos Afanador Caicedo y Jorge Alejandro Moreno Salgado*

La resistencia al esfuerzo cortante es un parámetro que está fuertemente influenciado por las condiciones *in situ*; uno de los parámetros más influyentes es el contenido de agua, el cual varía en el tiempo y según las propiedades del material. Esto dificulta la obtención de muestras representativas en condiciones no saturadas, generando por ende distorsiones en los valores de los parámetros de resistencia y baches que la ingeniería ha tenido que afrontar en la práctica.

# Contenido

## 37-46

### **Caracterización sísmica de fallas colombianas por analogía con fallas conocidas geológica y sismológicamente**

*Paula Margarita Herrera Suárez y Andrés José Alfaro Castillo*

Los estudios de amenaza sísmica en Colombia cuentan con vacíos de información debido a dos causas principales: instrumentación sísmica insuficiente en el tiempo y en el espacio, y desconocimiento del comportamiento de las fallas geológicas. Por esta razón, se caracterizaron ciertas fallas que afectan ciudades de Colombia por medio de una analogía geológica y sismológica, con algunas de las fallas geológicas mejor caracterizadas del mundo.

## 47-56

### **Energía de fractura en modo I del concreto de resistencia normal reforzado con fibras cortas de acero**

*Sergio Mauricio Segura Arenas y Fabián Augusto Lamus Báez*

En este trabajo se determinó experimentalmente el valor de la energía de fractura para concreto reforzado con fibras cortas de acero (SFRC, por su sigla en inglés), a partir de mezclas de concreto de resistencia normal en Colombia. Se prepararon probetas para tres tipos de mezclas de concreto con relaciones agua/cemento: 0,58, 0,50 y 0,40, sin refuerzo y reforzadas con tres cuantías volumétricas de fibra de acero: 0,5, 1,0 y 2,0 %.

## 57-64

### **Las mallas computacionales en ámbitos organizacionales**

*David Emmanuel García Cáceres y Rafael Guillermo García Cáceres*

Las mallas computacionales se han desarrollado y conformado como una potente herramienta que brinda múltiples soluciones y opciones tanto en ámbitos científicos, como académicos y empresariales. Para un porcentaje alto de profesionales, el objetivo de este tipo de infraestructura es que se convierta en un recurso global al alcance de las comunidades, que permita el trabajo colaborativo de diferentes individuos mediante recursos y redes distribuidas.

## 65 / ALCANCE Y POLÍTICAS

# Editorial

## ¿Es una opción rendirnos ante la corrupción?

**PAULA XIMENA RÍOS REYES**

Profesora Asociada de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

paula.rios@escuelaing.edu.co

“La corrupción es peor en el sector privado que en el público”. Este fue el titular publicado hace un par de meses en varios periódicos del país. Explicaban como los empleados desarrollan redes y métodos de corrupción muy parecidos a los que utilizan en el sector público, crean concursos privados donde los requisitos absurdos solo los cumplía el proveedor que el empleado quería favorecer, filtraban información o utilizaban todo tipo de métodos para obtener beneficios particulares, originando así ineficiencia, costos ocultos y pérdida de productividad para la empresa. Uno de estos artículos, concluía diciendo “La crisis ética y moral de la sociedad es total. No es cierto que los únicos que roben sean los funcionarios públicos. Hay mucho ladrón de cuello blanco, corbata, título universitario y pinta de persona honesta en el sector privado” (Miguel Gómez Martínez, periódico *Portafolio*, 4 de abril de 2014).

A pesar que las denuncias del autor no me sorprendieron porque tristemente es un secreto a voces, me sobrecogió el hecho que mencionara que estas personas tienen título universitario. Nuevamente no me impresionó saber que estas personas con conducta cuestionable fueran profesionales, sino que muchos de ellos seguramente se graduaron de universidades nacionales e internacionales reconocidas, universidades que luchan diariamente por la formación integral de sus estudiantes, universidades donde trabajan profesores, que como yo, nos encaminamos en este rumbo por la importancia de nuestra labor, porque estamos convencidos que la educación es lo único que puede generar un cambio cultural

y social, que permita que un país como el nuestro sea moderno, incluyente y competitivo.

Entonces, si las universidades dedican recursos inmensos para que los estudiantes a través de sus Proyectos de Formación y de la vida universitaria logren una formación integral, considerando esta formación como aquella que enriquece la relación del estudiante con el entorno, que incrementa su sensibilidad exponiéndolo a nuevos espacios socio-culturales, que impulsa su pensamiento crítico, creativo e innovador y que aporta a su desarrollo ético y moral, ¿por qué de 537 empresas que participaron en la Primera Encuesta Nacional sobre Prácticas Antisoborno, realizada por la organización no gubernamental Transparencia por Colombia y la Universidad Externado de Colombia, el 91% admite que existen empresarios que ofrecen sobornos en sus relaciones de negocios, y más preocupante aún, que el 54% de los entrevistados considere que el uso del soborno es una de sus estrategias de negocio?

¿Por qué en algunos de los profesionales del país no permea el ejemplo de muchos de sus profesores que se caracterizan por su integridad y rectitud? ¿Por qué después de muchos cursos de ética, de propiciar espacios que estimulan la formación de profesionales con criterio, los graduados de las universidades ignoran en su ejercicio profesional el principio básico según el cual debe prevalecer el interés general sobre el individual para lograr la eficiencia en una empresa? ¿Por qué después de vivir diariamente en una ciudad y en un país en la que la corrupción es la causa del atraso y de la

inequidad, y de sufrir directamente las consecuencias de las acciones corruptas de nuestros dirigentes, los profesionales se involucran en maniobras fraudulentas y no son capaces de romper con estas prácticas sucias?

No quiero pensar que la corrupción hace parte de la naturaleza de nuestro país, prefiero tener el pensamiento, para algunos utópico, que ésta es una práctica aprendida, que puede y debe ser erradicada de nuestra dinámica profesional.

A pesar de nuestra realidad, como profesora universitaria no me siento sin salida, me seguiré levantando todos los días con la ilusión de tocar el alma de mis alumnos, para que cuando se encuentren con las dinámicas mal consideradas tradicionales sean lo suficientemente valientes para no dejarse involucrar, para que tengan presente que el éxito profesional y la ética sí pueden ir de la mano.

Quedaré tranquila si logro que mis estudiantes entiendan que el éxito lo da la satisfacción de innovar, de crear, de gestar y desarrollar con perseverancia, en nuestro caso, proyectos de ingeniería que realmente contribuyan a la modernización de nuestro país. Es-

taré satisfecha cuando comprendan que realmente un profesional es exitoso, cuando se siente pleno en su trabajo, cuando trabaja a conciencia, con la tranquilidad de hacer las cosas bien, con rectitud e integridad, cuando disfruta y se siente orgulloso de los proyectos en los que ha participado, cuando ve los beneficios que ha aportado a la sociedad.

Enseñaré hasta al cansancio, que la ética es el camino a la libertad, como lo escuché de María Mercedes de Brigard, reconocida educadora y filósofa colombiana, quien me sensibilizó sobre el ser libre. Podremos encontrar tan anhelada libertad si nos hacemos las preguntas fundamentales y nos las respondemos en forma coherente con nuestra formación.

Desde la universidad, los profesores tenemos la responsabilidad de inculcar que no todo vale, de eliminar la lógica del dinero fácil, de suprimir la búsqueda del camino fácil y propiciar la pasión por lo que hacemos; debemos inculcar que el éxito está en soñar, tener una idea, trabajar con perseverancia en su desarrollo y disfrutar del placer que genera el haberlo hecho correctamente.

# Enfermedad holandesa: incumplimiento de la proporción de los factores

**EDUARDO SARMIENTO PALACIO**

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

eduardo.sarmiento@escuelaing.edu.co

## INTRODUCCIÓN

En la ortodoxia se considera que la presencia de recursos naturales no afecta significativamente el funcionamiento de las economías de mercado. La percepción es refutada con la expansión de las exportaciones de alimentos en Argentina en el siglo pasado y ahora con el petróleo en Venezuela. En general, se observa que las bonanzas de actividades de recursos naturales intensivas en divisas dan lugar a grandes elevaciones del ingreso nacional, seguidas por caídas que dejan averiadas las economías.

El tema no se ha tratado adecuadamente en la literatura especializada. Con base en el principio de Heckscher-Ohlin-Samuelson (HOS), uno de los más reconocidos en la teoría neoclásica y clásica, se considera que la abundancia de recursos naturales, o si se quiere su expansión, no afecta los funcionamientos regulares de las economías. Tan sólo se reconoce que la expansión de estas actividades genera un incremento en el ingreso que aumenta la demanda de bienes transables, como industria y agricultura, y los bienes no transables, como servicios y construcción. Adicionalmente, ocasiona una revaluación de tipo de cambio que induce a sustituir la producción de los primeros por importaciones. De esta manera, el aprovechamiento de los recursos naturales da lugar a un aumento de los servicios y una reducción de la industria. La economía se especializa en el bien

que emplea más intensamente el factor abundante y en servicios. Se configura un perfil de baja productividad y una revaluación que desmantela la producción de bienes transables.

Por lo general, se considera que una elevación de los ingresos de divisas, por una transferencia proveniente del exterior, la inversión extranjera o la aparición de fuentes de recursos naturales, induce una elevación de las importaciones que permite liberar recursos para producir otros bienes y elevar la producción y el consumo. En ese sentido, se considera que la inversión extranjera y los recursos naturales son una bendición que eleva el nivel de vida de los países. El apelativo es perfecto cuando los bienes son perfectamente sustituibles; el incremento del ingreso en dólares equivale a un aumento

---

**La inversión extranjera o la aparición  
de fuentes de recursos naturales  
induce una elevación de las  
importaciones, que permite liberar  
recursos para producir otros bienes  
y elevar la producción y el consumo.**

---

de los bienes físicos. Las cosas son muy distintas cuando se reconoce la presencia de bienes no transables que representan más de la mitad del consumo. En razón de que estos bienes son relativamente complementarios de los transables, la ampliación de las divisas da lugar a una revaluación que puede convertir la bendición en maldición.

### LA INSUFICIENCIA DE LA VENTAJA COMPARATIVA

En las teorías dominantes de comercio internacional, tanto de Ricardo como de HOS, se considera que hay una sustitución perfecta entre importaciones y producción nacional. La solución más eficiente se da cuando los países se especializan en los bienes intensivos en el factor abundante. De esa manera se genera el máximo volumen de divisas, y como esas son perfectamente sustituibles, implica la máxima producción.

El resultado presupone la sustitución perfecta de importaciones por producción nacional y que la productividad de todos los bienes sea igual en el margen. Lo que importa no es la contribución del trabajo y el capital a la producción y al empleo sino la generación de divisas, en la creencia de que éstas pueden incorporarse y sustituir sin consideración la producción doméstica. La visión anterior ha sido la base de grandes estímulos a los factores abundantes y al desprecio de la industrialización. La productividad absoluta de los bienes es irrelevante porque lo que importa es la generación de divisas que permita adquirirlos más baratos en el resto del mundo.

Lo anterior condujo a la creencia de que el desarrollo de los países depende de la dotación de los recursos



naturales y de que los bienes industriales, en particular los más complejos, se deben adquirir en el exterior. El hallazgo es totalmente invalidado en un mundo donde el 70 % del consumo se realiza en bienes no transables. No es cierto que los productos basados en recursos naturales intensivos en divisas se puedan expandir indefinidamente y que no haya diferencia entre la contribución de la industria y de los servicios al producto nacional. El error se origina en la idealización de las teorías de HOS y Ricardo y de libre comercio, que tiene una clara responsabilidad en el desarrollo truncado de América Latina, que les dio prioridad a las actividades en recursos naturales y ha permitido el abandono de la industria.

En las teorías de comercio internacional, todo es un misterio. No es fácil entender la razón por la cual los países deben producir los bienes que emplean más intensivamente las dotaciones abundantes. Los beneficios del comercio son independientes de las características de los productos y del perfil sectorial. No hay diferencia entre bienes complejos o rudimentarios, o entre bienes de alto y bajo valor agregado, porque lo que cuenta es el monto de divisas generado por la economía.

La predicción es controvertida por la realidad, que muestra que los países con estructuras dominadas por la industria y las actividades de mayor complejidad tecnológica crecen más. Tales son los casos de los tigres asiáticos, Japón y China, en virtud de que sus perfiles productivos no se encuentran en la generación de divisas sino en su contribución a la producción interna y en sus vínculos hacia adelante y hacia atrás.

La relación entre el comercio internacional y el crecimiento se inspiró en las teorías clásicas de Ricardo y HOS de ventaja comparativa. Las estructuras productivas deben estar representadas por las actividades intensivas en los factores abundantes, o de ventaja comparativa, que son las que generan más divisas y producción. Así, los países fueron inducidos por el mercado y los gobiernos a especializarse en las actividades que más contribuyen a ese resultado.

### ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS NATURALES

En los países ricos en recursos naturales ha surgido una especialización basada en actividades mineras o agrícolas que se caracterizan por la alta generación de divisas. Sin embargo, los países de la región que más han



avanzado en esa dirección han enfrentado dificultades de diferente tipo que han interferido en el desarrollo, e incluso en la misma estabilidad cambiaria. En general, se observa que están expuestos a bonanzas que elevan los ingresos y terminan en deficiencias cambiarias y tensiones recesivas. Sin duda, los mejores ejemplos son Argentina en el siglo pasado y Venezuela en los últimos quince años. Ambos países lograron niveles de ingresos muy superiores a los de la región y comparables a los de los países desarrollados, pero luego de un tiempo entraron en dificultades que los han relegado a los peores desempeños. Igualmente ilustrativo es el caso de Brasil, que tuvo un espectacular avance inducido por la industrialización, que se vio frustrado por la aparición de grandes posibilidades de aprovechamiento de los recursos naturales, tanto en minería como en la explotación de grandes extensiones agrícolas. Lo cierto es que estos países que han tenido la dotación privilegiada de recursos naturales revelan desempeños inferiores a los de otros más modestos y de menor tradición histórica.

En términos más simples, la especialización en actividades que emplean intensamente el factor abundante en las naciones ricas en recursos naturales es ineficiente, por no decir destructiva. Estamos ante una prueba incontrastable del fracaso de la teoría de HOS. La explicación está en la invalidez de las premisas de sustitución perfecta de divisas por producción, o si se quiere de bienes transables y no transables, la igualdad de las productividades de los bienes, en particular la industria y los servicios. La incorporación de estos elementos en una nueva teoría mostraría que la especialización en las actividades de ventaja comparativa, que son las que generan el máximo volumen de divisas, no es eficiente y puede precipitar la revaluación indefinida del tipo de cambio que devasta las actividades transables, e incluso las provenientes de los recursos naturales. Al final, se configura un déficit en cuenta corriente que amenaza la estabilidad cambiaria y contrae la demanda efectiva, que bien puede asimilarse a una gran enfermedad.

Tal vez el mayor cuestionamiento de la especialización en bienes basados en recursos naturales provino de la Cepal, en especial de Prebisch. A la luz de la experiencia de América Latina, advirtieron que los países que basaban el desarrollo y la dependencia de los recursos naturales enfrentaban serias dificultades y quedaban a la zaga de los países desarrollados. Sin embargo, la explicación no fue más allá de la inelasticidad de la demanda

---

**En términos simples, la especialización en actividades que emplean intensamente el factor abundante en los países ricos en recursos naturales es ineficiente, por no decir destructiva.**

---

de los productos básicos y de las altas fluctuaciones de sus precios. La verdad es que el organismo advertía la inconveniencia de la especialización en los recursos naturales, pero sin precisar las razones que la causaban ni mucho menos las políticas alternativas. En el fondo, no se avanzó en una teoría mejor que la de HOS. No se sabía por qué en los países dotados de recursos naturales era malo especializarse en los productos que los empleaban intensivamente.

Por su parte, los trabajos científicos más reconocidos nunca tuvieron la teoría que explicara en forma convincente la perversidad del desarrollo basado en la abundancia de recursos naturales. Los trabajos de Cordeu y Sachs partían de la verdad de HOS y terminaban diciendo que no había razones sólidas claras para que la abundancia de los recursos naturales fuera distinta de la de otros factores y afectara los resultados del mercado competitivo. Al final, se caía en el simplismo de decir que el mal desempeño de los países dotados con recursos naturales obedece a malos manejos, sin especificar cuáles son, qué los motiva y cómo se evitan. Hasta el final se resistían a reconocer que la causa de los males está en la especialización de las actividades de ventaja comparativa que emplean intensivamente los recursos naturales.

### PROPOSICIÓN GEOMÉTRICA

La teoría de la proporción de los factores, como bien lo dice su rótulo, es una proposición geométrica. No hay diferencia entre países y productos. La única disparidad está en la dotación de los recursos. Los países se especializan en las actividades que emplean más intensivamente los factores abundantes porque de esa manera generan



el máximo volumen de divisas y, en consecuencia, la máxima producción. La teoría deja de ser válida cuando las divisas no pueden sustituir la producción nacional y las productividades de los sectores son diferentes. En esas condiciones, la especialización de los productos intensivos en recursos naturales induce un perfil en actividades de menos productividad absoluta y dan lugar a una revaluación que desmantela los bienes transables, termina en déficit en cuenta corriente y precipita crisis cambiarias y recesiones.

El error de los estudios de la enfermedad holandesa está en que parten de la validez de la teoría de HOS. En cierta forma, presumen que la especialización en recursos naturales produce el máximo volumen de divisas y, por lo tanto, la máxima producción. En razón de que existe una cierta complementariedad entre bienes transables y no transables, o entre servicios o industria, las divisas generadas en la especialización en las actividades que emplean intensamente los recursos naturales no tienen demanda. *Ergo*, la explicación de la enfermedad holandesa está en la invalidez del principio de la dotación de factores.

El error está en el teorema de H-O-S, que presupone que existe una sustitución perfecta entre los bienes y, más concretamente, que las divisas pueden sustituir en forma perfecta a la producción. Sólo así se puede esperar que el volumen máximo de divisas corresponda al volumen máximo de producción. Debido a que los con-

sumos de servicios y manufacturas son relativamente complementarios, la demanda de bienes industriales se agota. Los ingresos generados en los recursos naturales no pueden sustituir la producción interna. Se configura un exceso de oferta de divisas que ocasiona una caída del tipo de cambio que no genera las importaciones que lo detengan. El precio de la divisa llega a un valor ínfimo que desmantela los bienes transables, e incluso los intensivos en recursos naturales.

Para simplificar el problema supongamos por un momento que los bienes transables y no transables son complementarios. En este caso, el aumento de los ingresos da lugar a una oferta de divisas mayor que la demanda. El precio de la divisa desciende, sin inducir las importaciones y la demanda de divisas que la detenga. El abaratamiento de las divisas tendría lugar hasta que su precio llegara a un valor ínfimo. En ese momento, la producción de bienes transables se desmantelaría y surgiría un déficit en cuenta corriente que precipitaría una crisis simultánea de balanza de pagos y recesión.

El sistema se puede presentar mediante un sistema simple de ecuaciones. El aumento de los ingresos de divisas en la actividad pasada en recursos naturales da lugar a un incremento de la demanda de bienes no transables que se cubre con la producción nacional y de bienes transables que se atienden con la producción nacional y las importaciones. Adicionalmente, el incremento de la producción de los bienes no transables está condicionado a una reducción de la producción de los bienes transables por la restricción de empleo y capital.

$$\Delta x_1 = \partial \Delta x_3$$

$$\Delta x_2 = (1 - \partial)\Delta x_3 - \Delta M$$

$$\Delta x_1 + B\Delta x_2 = L$$

Donde  $\Delta x_3$  incremento de la producción de la actividad intensiva en recursos naturales,  $\Delta x_1$  aumento de la producción de bienes no transables,  $\Delta x_2$  incremento de la producción de bienes transables,  $\Delta M$  aumento de las importaciones,  $L$  restricción a la producción establecida por el capital y el trabajo, y  $\partial, B$  parámetros.

En efecto, se tiene un sistema de tres ecuaciones y cuatro variables que no se pueden satisfacer simultáneamente. El sistema está expuesto a un exceso permanente de oferta de divisas sobre la demanda que precipita la baja indefinida del tipo de cambio hasta el colapso final. Cuando  $\Delta x_2$  llega a cero, el sistema deja de ser consis-

tente. El número de variables es inferior al número de ecuaciones. La economía queda expuesta a un alza en los precios de los bienes transables y una revaluación que la sacan de cauce. Los resultados constituyen un serio cuestionamiento de las teorías de comercio internacional que han servido para construir la institución de la globalización.

Ante los fracasos económicos de las crisis de balanza de pagos de América Latina y Asia, la recesión del 2008 y los fracasos con el euro, los pensadores más reconocidos, como Stiglitz y Krugman, acusan a los gobernantes al argumentar que la teoría de la globalización es correcta y que la falla no está en la globalización sino en la forma en que se hizo. Los resultados de este artículo conducen a una interpretación más objetiva. La falla está en la teoría que predice que la especialización en los productos de ventaja comparativa conduce a la solución más eficiente, porque la asignación de recursos maximiza la producción, y más equitativa, porque todo el mundo gana. Por el contrario, en algunos casos, como por ejemplo en los países dotados con abundantes recursos naturales, conduce a soluciones ineficientes e inequitativas. La abundancia de recursos naturales propicia perfiles de baja productividad y puede resultar en grandes revaluaciones del tipo de cambio que desmantelan las actividades transables. Se configura un déficit creciente de balanza de pagos que termina en crisis cambiaria y recesión.

## PRODUCTIVIDAD ABSOLUTA Y RELATIVA

La enfermedad holandesa es la consecuencia de un monumental desvarío del mercado que contradice las teorías existentes del comercio internacional y escogencia sectorial. Sus efectos devastadores obedecen, en buena medida, al desconocimiento de esta realidad. Se da por hecho que la revaluación es un ajuste de equilibrio del mercado que corrige los desbalances del sistema y que las productividades de los sectores se igualan en el margen, pero, por el contrario, es un ajuste típico de desequilibrio que tiende a reforzarse.

El sistema sólo se puede operar dentro de una amplia presencia del Estado en la intervención del tipo de cambio y en la selección de los sectores. Adicionalmente, se requiere la aplicación de subsidios, o en su defecto aranceles, para incorporar las diferencias de productividad relativa entre la industria y los servicios.

En la práctica, se le daría prioridad a la canasta que resulte en la máxima suma de productividad absoluta y productividad relativa, definida como la diferencia entre la productividad externa e interna. Supongamos que la productividad absoluta es  $V$  y la productividad del resto del mundo  $V^*$ . El índice total de productividad estaría dado por la suma ponderada de las productividades absoluta y relativa.

En la teoría de Ricardo se establece que la solución óptima corresponde a la máxima productividad relativa y en HOS las de mayor productividad absoluta. Ambos están equivocados porque desconocen las limitaciones de demanda, como ocurre con los bienes no transables o los bienes basados en recursos naturales intensivos en divisas. En un mundo de estas características, que se asemeja más a la realidad, la prioridad debe estar en los bienes que tienen la mejor combinación de productividad absoluta y relativa. Supongamos que la productividad absoluta está dada por  $V$  y la del resto del mundo por  $V^*$ . La suma ponderada de las dos productividades estaría dada por:

$$V + \beta (V^* - V) \quad \beta \text{ parámetro}$$



La solución óptima estaría representada por la canasta que maximiza la suma ponderada de las dos productividades, y se lograría con un arsenal selectivo de subsidios. Si el sistema se deja al mercado, el perfil productivo óptimo estaría representado por las actividades de mayor ventaja relativa. Si el subsidio se iguala



a las diferencias de productividad relativa, el perfil correspondería a las actividades de mayor productividad absoluta.

La escalera tecnológica sustituye la productividad relativa de Ricardo y la productividad absoluta de HOS. En su lugar, se plantea un índice igual a la suma ponderada de la productividad absoluta y la relativa. La prioridad estaría en los sectores que generaran la mayor suma de las dos productividades.

En síntesis, tanto las teorías de Ricardo de la productividad relativa como de HOS de productividad absoluta no se cumplen cuando las actividades están expuestas a limitaciones de demanda. El libre mercado conduce a una especialización dominada por las productividades relativas. Por su parte, la intervención selectiva en cuantías equivalentes a las diferencias de productividad con los países desarrollados conduce a la especialización dominada por las productividades absolutas.

En general, se puede esperar que el componente de mayor productividad absoluta contribuya más que el de productividad relativa. La protección óptima estaría dada por la canasta de mayor productividad relativa que genere mayor productividad absoluta y equilibrio de la balanza de pagos. En la práctica, se conseguiría con una protección que en un principio les dé prioridad a las actividades de más alta productividad relativa que no se producen, y entre ellas a las de mayor productividad absoluta, y luego, en la medida en que avance el aprendizaje en el oficio, se traslade a otras actividades de menor productividad relativa y mayor productividad absoluta, hasta cubrir la totalidad del espectro industrial.

---

**La enfermedad holandesa adquiere visos alarmantes en economías expuestas a movimientos de capitales por inversión extranjera o crédito externo.**

---

## INVERSIÓN EXTRANJERA

La enfermedad holandesa adquiere visos alarmantes en economías expuestas a movimientos de capitales por inversión extranjera o crédito externo. La revaluación inducida por el endeudamiento induce entradas de capitales que acentúan la revaluación e inducen más entradas de capitales. A pesar de la abundancia de divisas, la economía tiende a un déficit en cuenta corriente en que incluso las actividades intensivas en recursos naturales dejan de ser competitivas. Las economías pasan a depender en su totalidad de la inversión extranjera y el déficit en cuenta corriente tiende a incrementarse en forma indefinida. Inevitablemente, se llega a un punto en que el déficit en cuenta corriente no es financiable o genera una contracción de demanda efectiva que precipita la economía en recesión y crisis cambiaria. Es difícil imaginar una política tan destructiva como dejar abiertas las economías que carecen de abundancia de divisas por los recursos naturales. De hecho, quedan abocadas a la crisis cambiaria o a la recesión. La abundancia de dólares destruye las actividades transables, e incluso las de mayor ventaja comparativa, como las intensivas en recursos naturales.

El proceso se torna preocupante. La revaluación eleva los ingresos por el abaratamiento de las importaciones y amplía el acceso al crédito, porque la revaluación y la baja tasa de interés significan costos financieros negativos. A su turno, el déficit en cuenta corriente amplía la capacidad de absorberlo sin causar presiones inflacionarias. Ambos factores inducen un disparo del consumo sin fundamentos sólidos y sostenibles.

La destorcida resulta inevitable. Tarde o temprano se llega a un punto en que la devaluación y el déficit no pueden continuar. El sistema pasa a un estado de devaluación y expectativas que cambian drásticamente el panorama. Los ingresos del trabajo y el capital bajan y los costos del crédito aumentan, en mayor grado el externo. Los agentes económicos quedan sin capacidad de cubrir las obligaciones contraídas con mayores ingresos y menores tasas de interés. La cartera bancaria se deteriora y las instituciones restringen el crédito. El público baja el consumo y el déficit en cuenta corriente queda descubierto. Aparece un exceso de ahorro sobre la inversión y el sistema se precipita en caída libre. El resultado sólo se puede evitar con un déficit fiscal que no puede ser muy distinto del déficit en cuenta corriente en términos nominales.



## CONCLUSIONES

Hace treinta años, en un estudio realizado para la Organización de las Naciones Unidas, planteé que los países ricos en recursos naturales estaban expuestos a un perfil productivo que conducía a bajas tasas de crecimiento e inestabilidad, que bien podía calificarse como enfermedad. Más aún, mostré que el resultado provenía del incumplimiento de la teoría más reconocida de la ciencia económica, que lleva el nombre de los tres más célebres premios Nobel, que en ese momento estaban en toda su plenitud. De acuerdo con esta teoría, los países deben especializarse en las actividades que emplean más intensivamente los factores más abundantes. El planteamiento se interpretó como una herejía que excedía las expectativas de investigación que buscaban la explicación en las teorías dominantes de la ciencia económica. Mal podía aceptarse que la enfermedad holandesa fuera el resultado del fracaso de la teoría de proporción de factores, que predice que la especialización en las actividades basadas en recursos naturales constituye la solución más eficiente y no altera el funcionamiento de las economías que operan dentro del mercado competitivo.

Pues bien, luego de observar en estos últimos años el desempeño de Argentina, Venezuela, Brasil y Colombia, desde luego, he llegado al convencimiento de que estaba en lo cierto. El mal desempeño de los tres primeros obedece a la especialización en actividades que generan abundancia de divisas, como Argentina, en la Pampa, Venezuela en el petróleo y recientemente Brasil en la explotación y grandes extensiones de tierra y agua. Por su parte, Colombia está entrando en el mismo grupo con el petróleo. No es aventurado afirmar que los países que disparan la producción de los bienes basados en recursos naturales generan una factura de divisas que dan lugar a espectaculares bonanzas que terminan en tragedia.

La explicación está en el simplismo de la teoría de HOS que presupone una sustitución perfecta en el consumo de bienes. Más concretamente, las divisas pueden sustituirse por la producción doméstica. La presunción no tiene ninguna validez en la realidad, donde la mitad del consumo está representada por bienes no transables, como servicios y construcción, que son relativamente complementarios de los bienes transables. En tales condiciones, los ingresos de divisas provenientes de los bienes intensivos en recursos naturales se destinan



en una fracción a las importaciones. La parte restante constituye un exceso de oferta de divisas que precipita una caída del tipo de cambio que se refuerza y desmantela la producción de bienes transables, incluso los provenientes de los recursos naturales, y terminan en déficits en cuenta corriente que desembocan en crisis cambiaria y recesión.

América Latina experimenta en la actualidad la enfermedad holandesa. El alza de los precios de los productos básicos ocasionó una cuantiosa revaluación y una elevación de los ingresos por el abaratamiento de las importaciones. En el presente año se están pagando los costos de la destorcida. La baja de los precios de los productos básicos de Argentina, Brasil, Venezuela, Chile y Perú ha ocasionado devaluaciones que han elevado la inflación, reducido los salarios y contraído la demanda y la producción. Las economías están en la transición de baja de salarios para ajustarse a la nueva realidad de los productos básicos. El producto nacional de la región crecerá en el año cerca de 2 %.

El estado de Colombia es similar, pero se manifiesta en forma distinta. El país experimentó la mayor revaluación de la región y la ha sostenido con mayores entradas de divisas, expansión de los servicios y construcción pública y privada, que han impulsado artificialmente la actividad productiva. Los costos de producción de los bienes transables son superiores a los internacionales, las exportaciones industriales y agrícolas se desploman

y el empleo de buena calidad se desplaza masivamente por las importaciones de materias primas. Los mayores ingresos por el abaratamiento de las importaciones se consiguen a cambio de la caída de la industria y la agricultura, la baja productividad de la canasta de producción interna, el empleo de calidad y la conformación del déficit en cuenta corriente más grande de América Latina.

De hecho, se requiere una nueva teoría que reconozca que todos los bienes no se pueden colocar indefinidamente en los mercados internacionales. Las divisas generadas en los bienes intensivos en recursos naturales no sirven para adquirir bienes transables y éstos no se pueden intercambiar en los mercados internacionales. En suma, la ampliación de las actividades de recursos naturales es limitada por la demanda de bienes transables. La solución óptima no corresponde a la especialización en bienes intensivos en recursos naturales y servicios. Se acerca más a un perfil dominado por los sectores de mayor productividad absoluta, como la industria y la agricultura.

Como alternativa se plantea sustituir la teoría de ventaja comparativa por la teoría de la productividad absoluta y relativa. La prioridad pasaría a estar en los sectores que generen la mayor suma de productividades. La tarea se podría llevar a cabo con un manejo que les dé prioridad a las actividades de ventaja comparativa que tengan más demanda y productividad absoluta, y progresivamente se desplace a actividades de mayor complejidad y menor productividad relativa.

La enfermedad holandesa sólo se puede enfrentar con una amplia presencia del Estado en materia co-

mercial y cambiaria. Para esto se necesita, en primer lugar, proteger a la industria con un sistema de aranceles y subsidios que les den un tratamiento distinto a las exportaciones y el mercado interno. En segundo término, aplicar un sistema de protección industrial escalonada que, con base en la escalera tecnológica, les dé prioridad en un principio a las actividades de mayor productividad relativa y absoluta que no se producen en el país, y en la medida en que la productividad se eleve por el aprendizaje en el oficio, se pase a actividades de menor productividad relativa y mayor complejidad hasta cubrir la totalidad del espectro industrial. En tercer lugar, adoptar un tipo de cambio ajustable y establecimiento de un fuerte sistema de control de ingreso de divisas de inversión extranjera.

## BIBLIOGRAFÍA

- Corden, M. (1982). *Booming sector and Dutch – Disease Economic: A survey Surrey*. Working paper. Australian National University.
- Corden, M. (1982). Booming sector and industrialization in a small open economy. *The Economic Journal*.
- Kemp, M. (1964). *The pure theory of international trade* (1966). Englewood Clift, New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- Sachs, J.D. & Warner, A.M. (1995). Economic Reform and the Process of Global Integration. *Brookings Papers on Economic Activity*.
- Sachs, J.D. & Warner, A.M. (1997). *Natural Resource Abundance and Economic Growth*. Harvard Institute for International Development.
- Sarmiento, E. (1990). Crecimiento en países plenos en recursos naturales. En *Nuevos desafíos del desarrollo*. Bogotá: Tercer Mundo Editores - Ediciones Uniandes.
- Sarmiento, E. (2002). *El modelo propio*. Bogotá: Grupo Editorial Norma - Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sarmiento, E. (2011). *Transformación productiva y equidad*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.



# Eficiencia de un tratamiento fisicoquímico en aguas residuales de una industria de productos lácteos

Efficiency of a physicochemical treatment process of industrial wastewater of a dairy industry

ÉDISON LEANDRO GARCÍA OSPINA<sup>1</sup> - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>2</sup>

1. Ingeniero ambiental y sanitario. Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

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

leaogarcia@gmail.com. - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 18/01/2014 Aceptado: 15/02/2014

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

## Resumen

En este artículo se compendian los resultados de eficiencia de remoción en DQO, DBO, SST y G y A en aguas residuales de una industria lechera, aplicando cuatro opciones de tratamiento fisicoquímico<sup>(1)</sup>.

**Palabras claves:** aguas residuales industriales, tratamiento de aguas residuales, industria lechera.

## Abstract

This paper does a review of removal efficiency achieved in COD, BOD, SST, Fats and Oils in industrial dairy wastewater applying four options of physicochemical treatment<sup>(1)</sup>.

**Keywords:** industrial wastewater, dairy wastewater treatment, wastewater treatment.

## INTRODUCCIÓN

La industria analizada produce queso y se cataloga como una empresa pequeña de lácteos, ubicada en la ciudad de Bogotá.

Las aguas residuales que descarga la industria al alcantarillado público de la ciudad no cumplen los requerimientos de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) en su Resolución 3957 de 2009<sup>(5)</sup> (cuadro 1), por lo que se requiere un tratamiento eficiente y fácil de implementar<sup>(6,7)</sup>.

**Cuadro 1**  
Caracterización del agua residual industrial sin tratamiento

Parámetro analizado	Unidad	Valor	Norma	¿Cumple?
GyA	mg/L	128	100	No
DBO <sub>5</sub>	mgO <sub>2</sub> /L	2300	800	No
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	3926	1500	No
pH	Unidades	5,81	5 a 9	Sí
SAAM	mg/L	3,54	10	Sí
Temperatura	°C	20,7	30	Sí
Sólidos Sed.	mL/L-h	<2	2	Sí
SST	mg/L	441	600	Sí
Fenoles	mg/L	0,08	0,2	Sí

La caracterización (cuadro 1) indica la necesidad de remover materia orgánica para cumplir con la norma de vertimiento. Dadas las condiciones de espacio disponible y de facilidad de operación del tratamiento se escoge como opción de tratamiento un proceso fisicoquímico, aunque se reconoce que también es factible el tratamiento biológico.

## OPCIONES DE TRATAMIENTO

La opción 1 de tratamiento consiste en aplicar un coagulante de origen vegetal llamado Tanfloc, con un polímero de alto peso molecular y posterior sedimentación. El Tanfloc es un polímero orgánico catiónico, de bajo peso molecular, de origen vegetal, producido por la empresa brasileña Tanac S.A., que actúa como coagulante - floculante y está disponible en forma líquida. La opción 2 de tratamiento incluye la aplicación de policloruro de aluminio (PAC), con un polímero de alto peso molecular y sedimentación. El policloruro de

aluminio ( $Al(OH)_xCl_y$ ), se aplicó en forma líquida. La opción 3 de tratamiento incluye proceso de coagulación con Tanfloc y un polímero catiónico de alto peso molecular, seguido de floculación, sedimentación, filtración por tela filtrante y adsorción en carbón activado. La opción 4 de tratamiento es un proceso de oxidación avanzada (POA) mediante la aplicación de un oxidante y un catalizador, seguido de coagulación, floculación, sedimentación, filtración en grava y arena y adsorción en carbón activado. El reactivo oxidante fuerte utilizado es conocido como reactivo AQ-21, compuesto principalmente por peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), e hipoclorito ( $OCl^-$ ), que puede usarse también como desinfectante, de estado líquido, soluble en agua. Como catalizador se aplicó el reactivo AQ-22, compuesto de hierro con una sal ácida de alto peso molecular, en estado líquido.

Los vertimientos de la industria lechera contienen altas concentraciones de grasas y aceites; sólidos suspendidos, coloidales y disueltos; de color lechoso, con turbiedad alta, materia orgánica suspendida y disuelta, que generalmente limitan la probabilidad de descargarlos directamente al alcantarillado municipal. En el tratamiento de las aguas residuales de la industria lechera se aplican, por tanto, tratamientos fisicoquímicos y biológicos, generalmente en combinación.

Los procesos de oxidación avanzada (POA) tienen gran potencial de aplicación en el tratamiento de aguas residuales industriales para aumentar la eficiencia en remoción de un proceso convencional. Los POA se fundamentan en la generación de un radical con alto poder oxidante, específicamente de radicales hidróxidos, para así poder oxidar compuestos orgánicos en productos finales como dióxido de carbono y agua<sup>(2)</sup>.

Entre los POA, el proceso Fenton (utilización de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas) permite oxidar materia orgánica y eliminar color, y ha sido útil como pretratamiento de compuestos no biodegradables<sup>(3)</sup>. Para volúmenes o caudales pequeños el tratamiento con el proceso Fenton, por cochadas, puede ser ventajoso<sup>(4)</sup>.

## RESULTADOS

A continuación se muestran el diagrama de flujo y los resultados de la opción 1 de tratamiento.



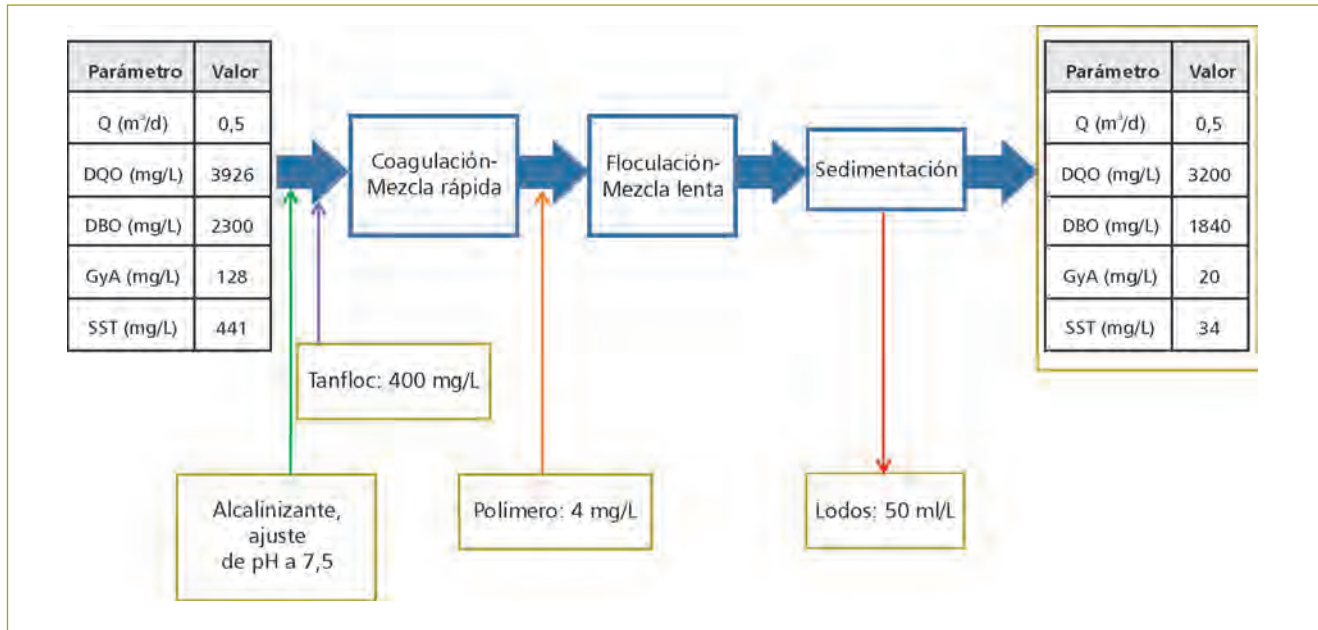


Figura 1. Diagrama de flujo del tratamiento con Tanfloc.

Como se puede observar, la opción 1, tratamiento con Tanfloc y polímero, no rinde lo necesario para cumplir la norma de vertimiento.

Seguidamente se ilustra el diagrama de flujo de la opción 2 de tratamiento (figura 2).

Como se puede apreciar, la opción 2, tratamiento con policloruro de aluminio y polímero, no satisface los requerimientos del tratamiento.

En la página siguiente se presenta el diagrama de flujo de la opción 3 de tratamiento (figura 3).

Como se observa en dicha figura, esta opción tampoco satisface los requerimientos del tratamiento.

También en la página que aparece a continuación se ilustra el diagrama de flujo del POA (figura 4).

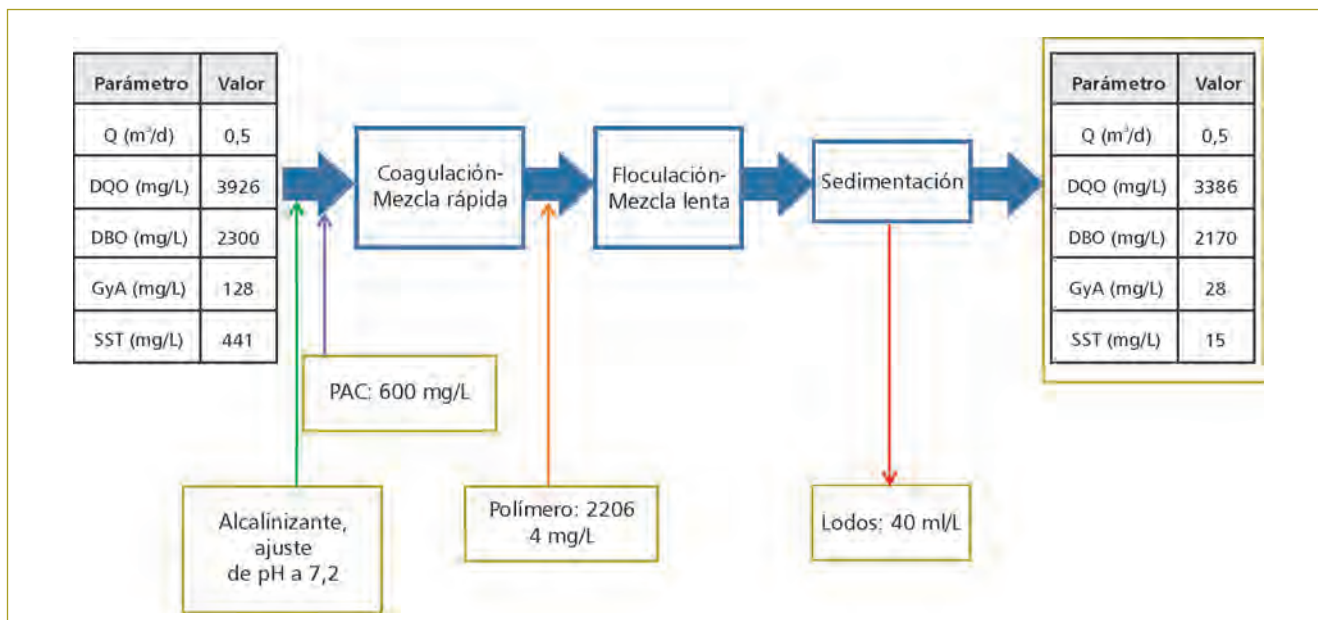


Figura 2. Diagrama de flujo del tratamiento con PAC y polímero.

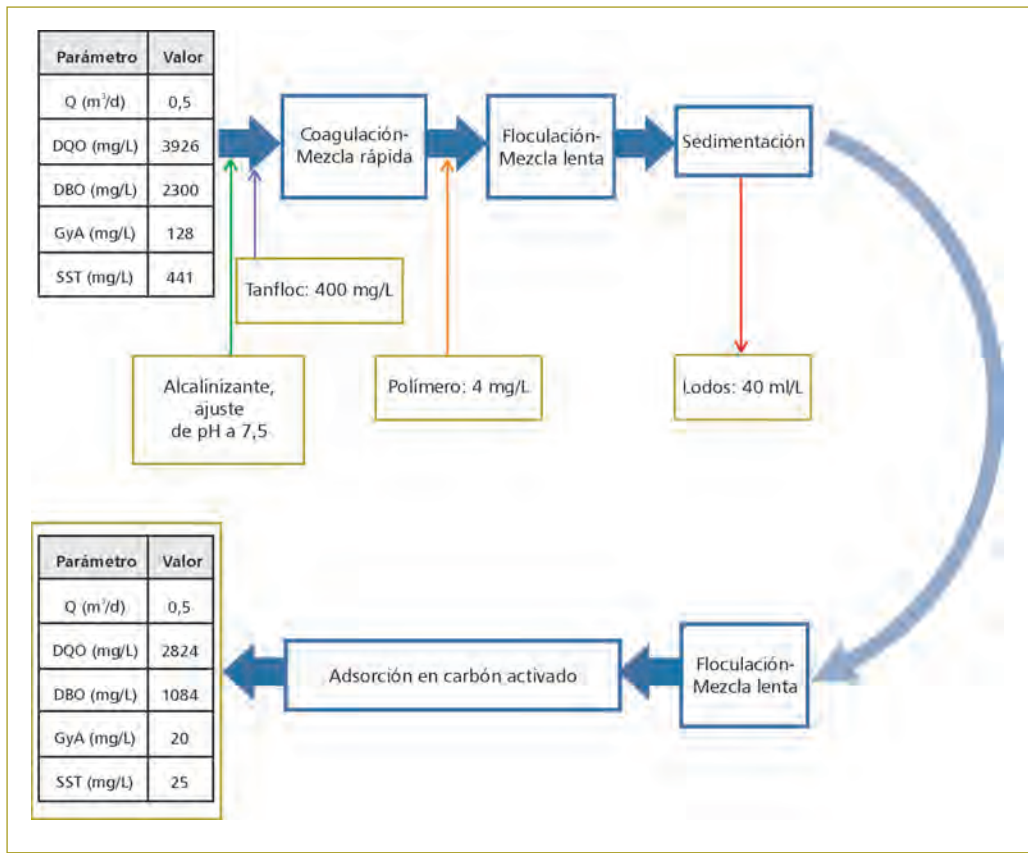


Figura 3. Diagrama de flujo del tratamiento con Tanfloc, polímero, filtración y adsorción en carbón activado.

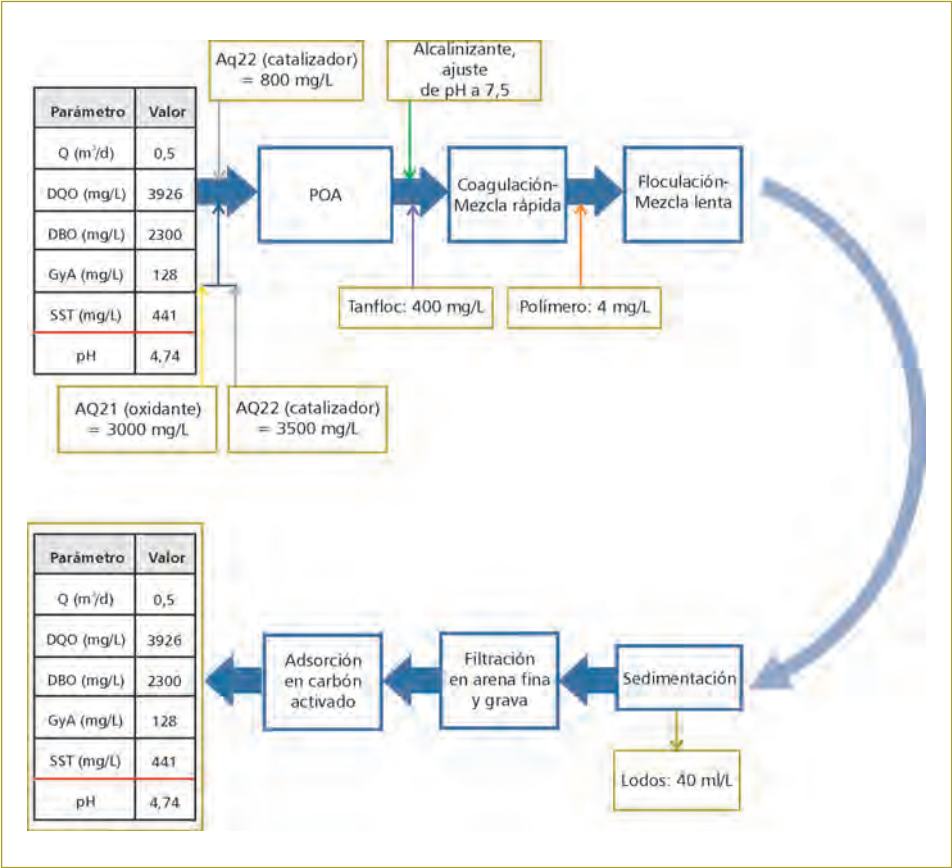


Figura 4. Diagrama de flujo del tratamiento con POA, coagulación, Tanfloc, sedimentación, filtración y adsorción.

**Cuadro 2**  
Resultados del tratamiento fisicoquímico

Parámetro	Agua cruda	Opción 1 de tratamiento		Opción 2 de tratamiento	
		Valor (mg/L)	Eficiencia (%)	Valor (mg/L)	Eficiencia (%)
DQO	3926	3200	18,5	3386	13,8
DBO <sub>5</sub>	2300	1840	20	2170	5,7
GyA	128	20	84,4	28	78,1
SST	441	34	92,3	15	96,6

Parámetro	Agua cruda	Opción 3 de tratamiento		Opción 4 de tratamiento	
		Valor (mg/L)	Eficiencia (%)	Valor (mg/L)	Eficiencia (%)
DQO	3926	2824	28,1	1388,5	64,6
DBO <sub>5</sub>	2300	1084	52,9	539	76,6
GyA	128	20	84,4	6,5	94,9
SST	441	25	94,3	23	94,8

Como se observa en la figura anterior, el proceso con oxidación avanzada permitió obtener los requerimientos de tratamiento necesarios.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el cuadro 2 se presenta el resumen comparativo de los resultados obtenidos en las cuatro opciones de tratamiento ensayadas.

De esto se deduce que la única opción de tratamiento con la que se logra cumplir la norma de DQO es la 4 (POA), puesto que se alcanza una concentración de DQO del agua tratada menor de 1500 mg/L. Con las opciones de tratamiento 1, 2 y 3 los valores de la DQO están muy por encima de los 1500 mg/L, lo cual impide cumplir la norma de vertimiento.

Así mismo, se muestra que la opción 4 de tratamiento arroja la eficiencia de remoción más alta en DBO, cerca del 77 %, seguida de la opción 3 con un 53 %. La eficiencia en DBO de la opción 1 de tratamiento no supera el 20 % y la opción 2 remueve sólo 6 % de DBO.

Se establece claramente que sólo con la opción 4 de tratamiento se puede cumplir con la norma, puesto que el agua tratada con el POA muestra una DBO inferior a 800 mg/L.

Las cuatro opciones de tratamiento alcanzan eficiencias de remoción de SST similares, todas superiores al 92 %, y cumplen la norma para SST de 600 mg/L.

Las eficiencias de remoción en GyA son altas, sobresaliendo la eficiencia que se alcanzó con la opción 4 de tratamiento (94,9 %), seguida de las opciones 1 y 3 (84,4 %) y finalmente la opción 2 (78,1 %).

Las cuatro opciones de tratamiento cumplen la norma de vertimiento para grasas y aceites de 100 mg/L, siendo el mejor resultado la opción 4, con la que se obtiene una concentración inferior a 10 mg/L.

La implementación de un POA, seguido de un tratamiento con coagulación, sedimentación, filtración y absorción con carbón activado, es una opción de tratamiento eficiente para empresas de la industria láctea que generen bajos caudales intermitentes de aguas residuales. Para industrias que generen altos caudales de aguas residuales esta alternativa implica dosificaciones altas de reactivos, generando costos de operación importantes. En esos casos deben evaluarse, comparativamente, tratamientos biológicos.

## PROCESO DE TRATAMIENTO

En la figura siguiente se ilustra el diagrama de flujo del proceso de tratamiento fisicoquímico propuesto (figura 5).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el tratamiento con Tanfloc y polímero (opción 1) se lograron eficiencias de remoción altas en SST (92,4

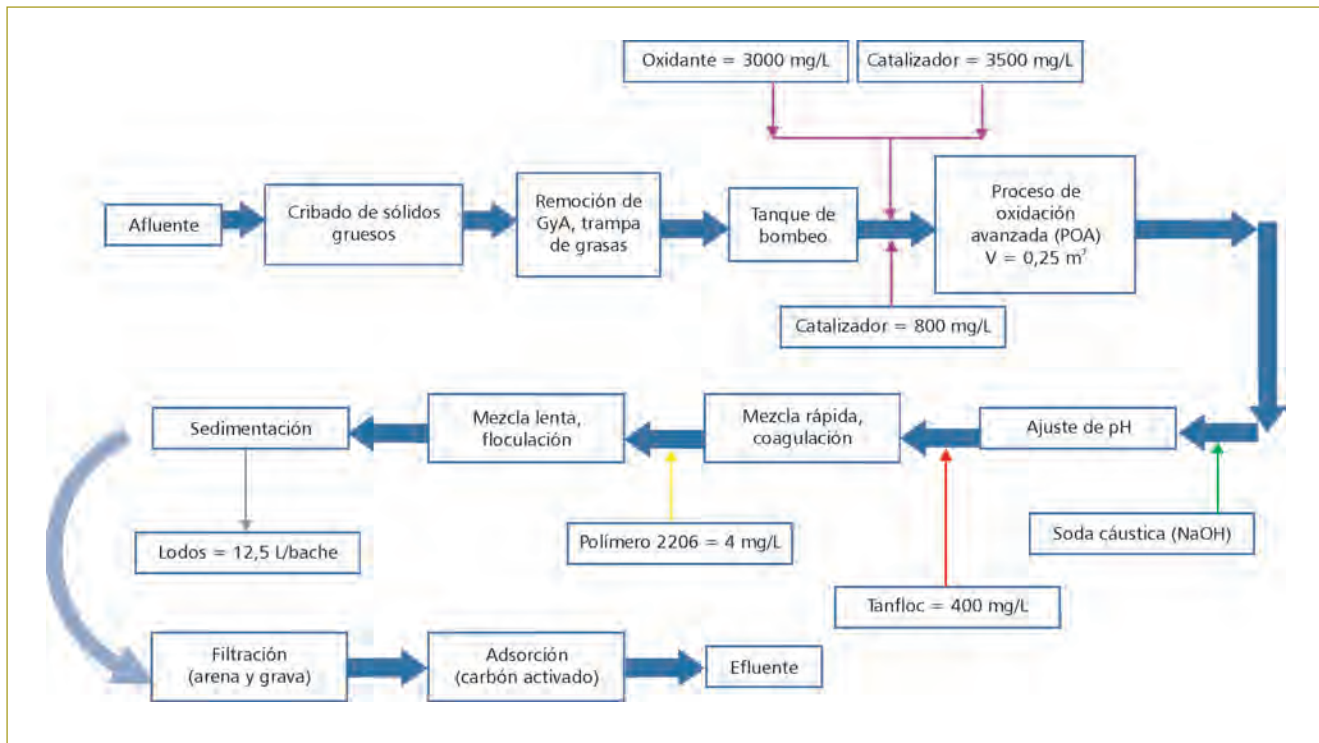


Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de tratamiento.

%) y GyA (84,4 %), suficientes para cumplir la norma de vertimientos; no obstante, las eficiencias de remoción en DQO (18,5 %) y  $DBO_5$  (20 %) no permiten cumplir la norma de vertimientos.

El tratamiento con policloruro de aluminio y polímero (opción 2) exhibe eficiencias de remoción en DQO y  $DBO_5$  muy bajas (del 13,8 y 5,7 %, respectivamente), e insuficientes para cumplir la norma de vertimiento. Sin embargo, las eficiencias de remoción en SST (96,6 %) y GyA (78,1 %) permiten cumplir la norma.

El tratamiento con Tanfloc y polímero más filtración y adsorción en carbón activado logra eficiencias de remoción en DQO del 28,1 % y  $DBO_5$  del 52,9 %, insuficientes para cumplir la norma de vertimiento.

El proceso de oxidación avanzada (POA) permite obtener remociones suficientes para cumplir la norma de vertimiento, con eficiencias de DQO y  $DBO_5$  del 64,6 y 76,6 %, respectivamente, y del 94,85 % en SST y 94,95 % en GyA.

- Se recomienda realizar ensayos adicionales de tratamiento con POA que permitan optimizar el proceso y visualizar la influencia de variables como el pH y las dosis de oxidante y de catalizador.

- El agua residual industrial cruda de la industria lechera analizada presentó la siguiente caracterización: DQO=3926 mg/L,  $DBO_5$  = 2300 mg/L, SST = 441 mg/L y GyA = 128 mg/L.

## REFERENCIAS

1. García Ospina, É.L. (2013). Eficiencia de un tratamiento físico-químico en aguas residuales de una industria de productos lácteos. Proyectos de grado. Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Bergendahl, J. & O'Shaughnessy, J. (2013). Applications of Advanced Oxidation for Wastewater Treatment. Disponible en <http://www.wpi.edu/Images/CMS/NEABC/wastewatersummary.pdf>. Consultado el 8 de agosto de 2013.
3. Domenech, X., Jardin, W. F. & Litter, M.I. (2013). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. Disponible en <http://www.Cnea.gov.ar/xxi/ambiental/cyted/06cap01.pdf>. Consultado el 8 de agosto de 2013.
4. Martínez, E.C. & López, G.D. (2013). Universidad Tecnológica Nacional de Argentina. Instituto de Desarrollo y Diseño (Ingar). Tratamiento químico de contaminantes orgánicos. El proceso Fenton. Consultado el 8 de agosto de 2013.
5. Secretaría Distrital de Ambiente (2009). Resolución 3957 de 2009. Bogotá.
6. Informe de la caracterización de aguas residuales (2012). Laboratorio Ambientiq Ingenieros.
7. Informe de la caracterización de aguas residuales (2013). Ambientiq Ingenieros SAS.



# Análisis simplificado de oxígeno disuelto en el río Ubaté

Simplified analysis for dissolved oxygen in the Ubaté river

**FELIPE SANTAMARÍA ALZATE<sup>1</sup> - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJÁS<sup>2</sup>**

1. Ingeniero ambiental y sanitario. Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

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

Ing.santamaria@gmail.com - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 19/01/2014 Aceptado: 20/03/2014

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

## Resumen

En este artículo se presentan los resultados de la modelación de OD y DBO para el río Ubaté, con base en una campaña de muestreo del año 2009 y en la formulación de tres escenarios de carga contaminante<sup>(1)</sup>.

**Palabras claves:** modelación, calidad del agua, polución de ríos, OD, DBO.

## Abstract

This article presents the modeling result of DO and BOD for the Ubaté river, based on the sampling campaign of 2009 and in the formulation of three stages of contamination load

**Keywords:** Modeling, water-quality, river pollution, DO, BOD.

## INTRODUCCIÓN

El río Ubaté, ubicado en el municipio de Cundinamarca, es el principal tributario de la laguna de Fúquene, que pertenece a su vez a la gran cuenca Ubaté-Suárez. Esta cuenca se caracteriza por su gran actividad lechera y de pastoreo, con gran demanda del recurso hídrico para sustentar la economía local y para abastecimiento de municipios aledaños y veredas colindantes a lo largo del río. Así mismo, es fuente receptora de las descargas de aguas residuales domésticas e industriales y de la afluencia de ríos como el Lenguazaque y Suta. En la cuenca se encuentran asentamientos humanos de importancia, como los municipios de Lenguazaque, Ubaté, Sutatausa, Carmen de Carupa, Tausa, Susa, Cucunubá, Suesca, Guachetá y Fúquene, siendo los primeros cuatro los de influencia directa en las características del río.

La Corporación Autónoma Regional (CAR) inició el proceso de mesas de consulta con los municipios para el establecimiento de metas de carga contaminante puntuales de DBO y SST sobre los principales cuerpos de agua del área de estudio, con el fin de dar así cumplimiento a lo estipulado como objetivos de calidad del agua para esta cuenca<sup>(2, 3, 4, 5)</sup>.

Para la simulación de calidad del río Ubaté se utiliza el modelo de Streeter y Phelps, calculando oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno por el QUAL2K de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Este es un programa comprensivo y versátil, de aplicación unidimensional, que puede usarse en con-



Figura 1. Localización de la cuenca del río Ubaté.

diciones de régimen permanente o no permanente, y que permite acoplar múltiples descargas, extracciones y afluentes, ya sean de carácter puntual o dispersas<sup>(6, 7, 8)</sup>.

## METODOLOGÍA

Para la utilización del programa QUAL2K, en régimen permanente, se seleccionaron estaciones de monitoreo (cuadro 1) de calidad del agua sobre el río Ubaté, y se usaron los resultados de la campaña realizada por la CAR en el año 2009 para la calibración del modelo<sup>(2)</sup>.

**Cuadro 1**  
Estaciones de monitoreo

N.º	Nombre
1	LM La Malilla
2	Aguas arriba río Hato
3	La Boyera
4	LG Puente Barcelona
5	Aguas abajo río Suta
6	LM Esclusa El Cubio
7	LG Puente Colorado

El comportamiento del caudal, velocidad y profundidad de flujo se define con los datos suministrados por la estación La Malilla con datos históricos desde el año 2002 hasta el año 2012, y por los de la estación Puente Barcelona con datos desde el año 2008 hasta el año 2012, obteniéndose las siguientes ecuaciones características para profundidad de flujo  $H$  y velocidad de flujo  $V$ , en función del caudal del río  $Q$ .

### Estación La Malilla

$$H = 0,3325 Q^{0,3995}$$

$$V = 0,7875 Q^{0,4274}$$

### Estación Puente Barcelona

$$H = 0,3727 Q^{0,3914}$$

$$V = 0,3181 Q^{0,3264}$$

La calibración del modelo se obtiene mediante el ajuste de las constantes de desoxigenación  $K_1$  y de reaeración  $K_2$ , de tal manera que el perfil simulado de

OD y DBO sea coherente con el perfil de OD y DBO medido.

El perfil de referencia (figura 2) y los resultados de la calibración (figura 3) se pueden observar a continuación:

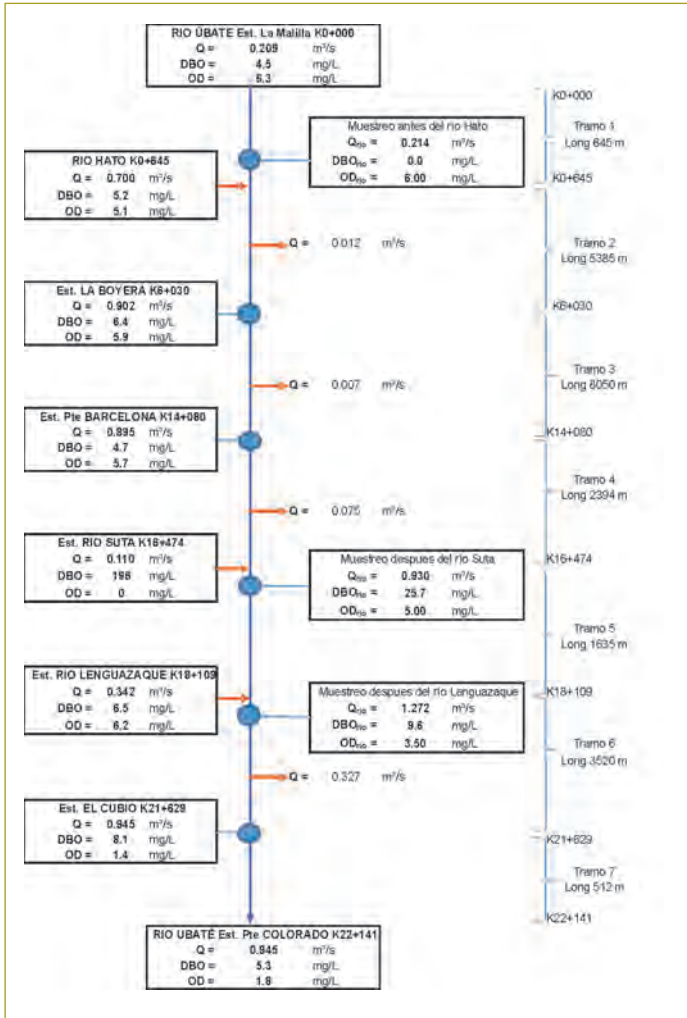


Figura 2. Perfil de referencia del río Ubaté.

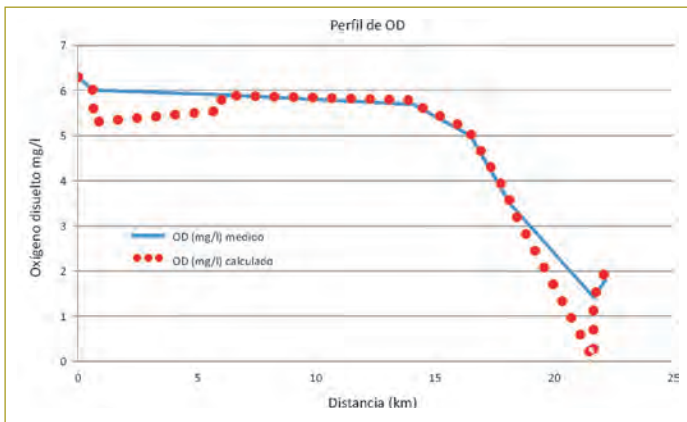


Figura 3. Curva de calibración del modelo.

Cuadro 2  
Constantes de calibración

Tramo	Constante ajustada		
	$K_1$ ( $d^{-1}$ )	$K_2$ ( $d^{-1}$ )	$K_2/K_1$
Tramo 1	1,0	3,5	3,5
Tramo 2	2,0	4,0	2,0
Tramo 3	1,8	4,0	2,2
Tramo 4	1,8	4,0	2,2
Tramo 5	2,0	8,0	4,0
Tramo 6	0,5	6,0	12,0
Tramo 7	2,0	1,0	0,5

RESULTADOS

La modelación se aplica a tres escenarios diferentes.

En primer lugar, una simulación del río con las condiciones para afluentes y efluentes actuales y suponiendo la ocurrencia de caudales mínimos en el río, cuyos resultados se observan más adelante (figuras 4 y 5). Para estas condiciones el oxígeno disuelto en el río Ubaté alcanza niveles cercanos al de saturación, hasta cuando se presenta la descarga del río Suta. En este punto, el aporte de materia orgánica, sin ninguna remoción, precipita la concentración de oxígeno disuelto por debajo de 1 mg/L, hasta su desembocadura en la laguna de Fúquene. La DBO, hasta la descarga del río Suta, mantiene valores por debajo de 10 mg/L, supera los 50 mg/L después de la descarga del río Suta y decrece hasta un valor de 33 mg/L en la desembocadura sobre la laguna de Fúquene.

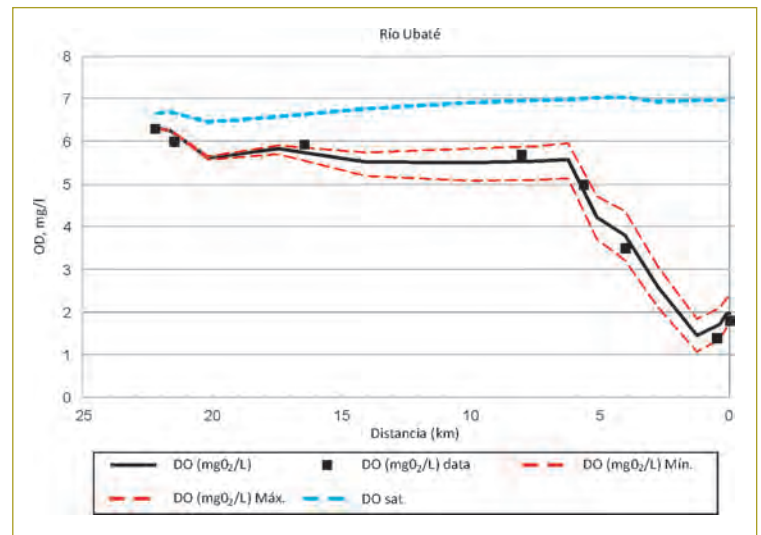


Figura 4. Curva de OD. Condiciones actuales.

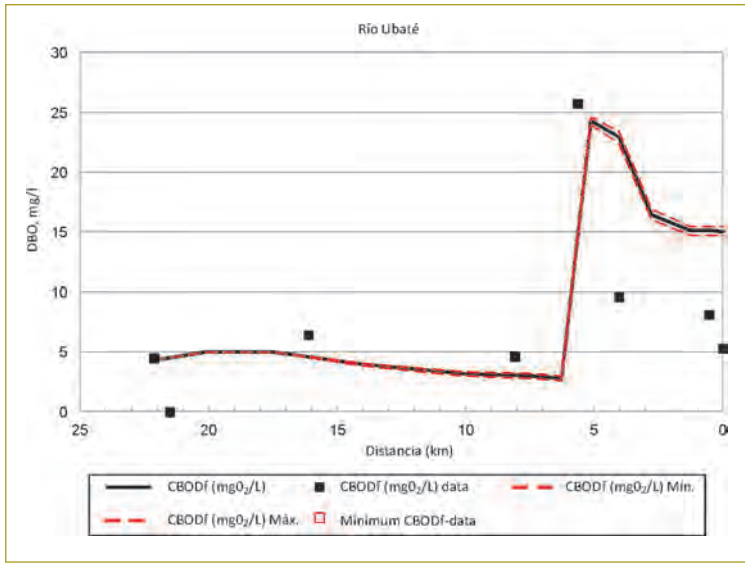


Figura 5. Curva de DBO. Condiciones actuales.

El segundo escenario supone la existencia de tratamiento primario para el afluente sobre el río Suta, así:

- Remoción del 40 % de DBO y OD de 2 mg/L en el río Suta.
- Caudales mínimos en el río y extracción de caudal iguales a los actuales.

La simulación indica que el tratamiento primario del afluente sobre el río Suta permite subir el OD a niveles superiores a 1,4 mg/L en todo el río (figura 6) y disminuir la concentración de DBO a 12 mg/L en la desembocadura, con un valor máximo de 21 mg/L, en la descarga del río Suta (figura 7).

El tercer escenario supone la existencia de tratamiento secundario para afluentes del río Suta, así:

- Remoción del 80 % de DBO y OD de 2 mg/L en el río Suta.
- Caudales mínimos en el río y extracción de caudales iguales a los actuales.

Con el tratamiento secundario, las concentraciones de OD superan los 3 mg/L en todo el río (figura 6), la concentración de DBO en la desembocadura es inferior a 7 mg/L y la DBO máxima es de 11 mg/L en la descarga del río Suta (figura 7).

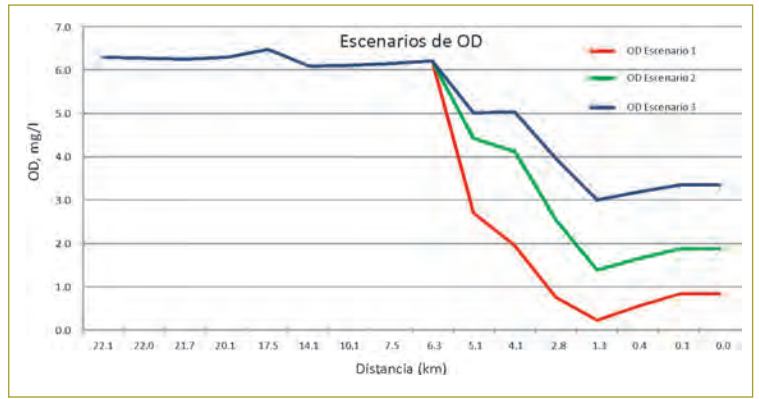


Figura 6. Curvas de OD en todos los escenarios.

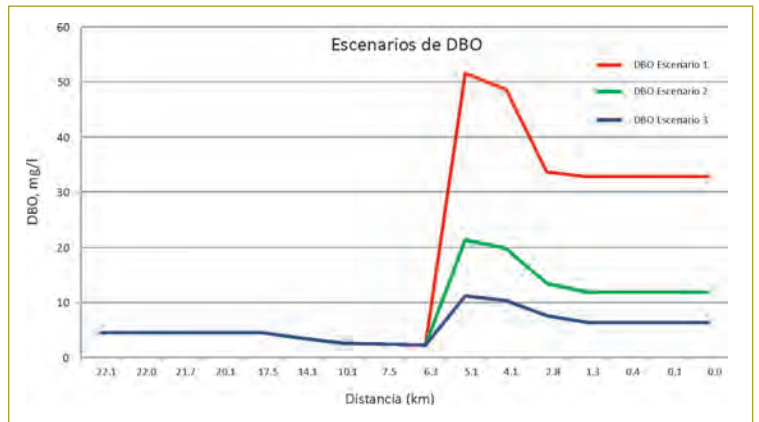


Figura 7. Curvas de DBO en todos los escenarios.

**Cuadro 3**  
Resultados de la simulación

Escenarios	OD, mg/L		DBO, mg/L		Desembocadura	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1	0,2	6,5	2	52	0,8	33
2	1,4	6,5	2	21	1,9	12
3	3,0	6,5	2	11	3,3	6,4

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El río Ubaté, en las condiciones actuales, muestra valores de OD en los primeros 16 km por encima de 6 mg/L, lo que indica condiciones de un río saludable. Sin embargo, después de la descarga del río Suta, la concentración de OD llega a valores por debajo de 1 mg/L, condición de un cuerpo contaminado.
- Según la Resolución 3462 de 2009, en las condiciones actuales el río Ubaté está catalogado como de clase



III, es decir, con agua apta para ganadería y para actividades agrícolas restringidas<sup>(4)</sup>.

- En las condiciones supuestas de estiaje del río Ubaté y con ningún tratamiento de afluentes, se presenta la condición más desfavorable de calidad del agua, con valores de OD cercanos a 0 mg/L y concentraciones de DBO por encima de los 50 mg/L que clasifican el río como de clase IV, apto sólo para actividades agrícolas restringidas<sup>(4)</sup>.
- Con tratamiento primario de los afluentes del río Suta la simulación indica que se alcanzaría una mejor condición de calidad, pero sin satisfacer los requerimientos de la CAR para un río de clase II, agua apta para consumo humano con tratamiento convencional, por tener valores de OD menores de 4 mg/L y DBO superiores a 10 mg/L<sup>(4)</sup>.
- Con tratamiento secundario de los afluentes del río Suta, la simulación revela niveles de DBO por debajo de 11 mg/L y OD mayores de 3 mg/L muy próximos a las condiciones de clase I, es decir, aguas aptas para consumo humano con tratamiento convencional y para conservación de fauna y flora, uso agrícola y recreacional<sup>(4)</sup>.
- Los perfiles de OD y DBO evaluados indican que la descarga del río Suta es la causante del deterioro de la calidad del agua del río Ubaté.
- Para la recuperación del río Ubaté se requiere el mejoramiento de sus afluentes, en especial del río Suta, el cual es el receptor de los sistemas de alcantarillado de las poblaciones existentes en dicha cuenca.
- Según la simulación, para que el río Ubaté pueda ser catalogado como un cuerpo de agua clase I es necesario implementar tratamiento secundario sobre las descargas de los sistemas de alcantarillado de los

municipios de Tausa, Sutatausa y Ubaté, sobre el río Suta, y garantizar una concentración de OD superior a 2 mg/L en los vertimientos de estos sistemas.

- Teniendo en cuenta que la simulación realizada se hace suponiendo constantes de cálculo ajustadas al perfil medido de OD en el río en el año 2009, es necesario, para una simulación posterior, implementar un programa de monitoreo de OD y DBO en el río Ubaté con determinación de los valores de  $K_1$  y  $K_2$  en terreno, para cada tramo de la simulación.

## REFERENCIAS

1. Santamaría Alzate, F. (2013). Análisis simplificado de OD en el río Ubaté. Trabajo de grado. Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
2. Corporación Autónoma Regional (CAR) (2010). *Boletín de calidad de las cuencas de la jurisdicción CAR 2007-2009*. Bogotá: CAR.
3. Unión Temporal Audicon - Ambiotec (2011). Diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca hidrográfica de los ríos Ubaté y Suárez. Bogotá: CAR.
4. CAR (2009). Resolución 3462 del 28 de diciembre de 2009, por la cual se establecen los objetivos de calidad del agua para la cuenca de los ríos Ubaté y Suárez, a lograr en el año 2020.
5. CAR (2011). Resolución 2152 del 22 de agosto de 2011, por la cual se inicia el proceso de consulta de metas de reducción de cargas contaminantes de DBO<sub>5</sub> y SST arrojados a los cuerpos de agua que conforman la cuenca, tramos y subtramos de los ríos Ubaté y Suárez.
6. Chapra, S., Pelletier, G. & Tao, H. (2008). *Qual2K. A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality*. Medford, MA: Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University.
7. EPA (1985). *Rates, Constants, and kinetic formulation in surface water Quality Modeling*. Athen, Georgia: U.S. Environment Protection Agency.
8. Romero Rojas, J.A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales*. 3.ª edición. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

# Ajuste a los parámetros de resistencia de depósitos de coluviones mediante correlaciones entre ensayos de laboratorio, exploración geotécnica y retrocálculo

Adjustment of resistance parameters in colluvium deposits through correlations between laboratory trials, geotechnical exploration, and retrocalculus

JUAN CARLOS AFANADOR CAICEDO<sup>1</sup> - JORGE ALEJANDRO MORENO SALGADO<sup>2</sup>

1. Ingeniero civil. Magíster en Ingeniería Civil. Consultor en Geotecnia y Pavimentos. Docente universitario. Gerente de Geotecnia y Cimentaciones Ltda.

2. Ingeniero civil.

juan.afanador@cimentar.net - msalejor@gmail.com

Recibido: 20/01/2014 Aceptado: 26/03/2014

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

## Resumen

La resistencia al esfuerzo cortante es un parámetro que está fuertemente influenciado por las condiciones *in situ*; uno de los parámetros más influyentes es el contenido de agua, el cual varía en el tiempo y según las propiedades del material. Esto dificulta la obtención de muestras representativas en condiciones no saturadas, generando por ende distorsiones en los valores de los parámetros de resistencia y baches que la ingeniería ha tenido que afrontar en la práctica.

La discrepancia de datos obtenidos con ensayos de laboratorio y de campo en relación con los datos arrojados mediante el análisis de retrocálculo es el fundamento en que se basará el presente artículo para determinar un factor de corrección a los datos experimentales, que permitirá vislumbrar valores más cercanos a las condiciones reales *in situ* en el momento de la falla.

Los valores obtenidos en ensayos de corte directo y SPT han permitido correlacionar matemáticamente sus resultados con los calculados mediante análisis de retrocálculo, correlación que facilitó obtener una aproximación aceptable de los parámetros de resistencia de depósitos de coluviones, que sirvan de referencia a futuros estudios de estabilidad en suelos de las mismas características, a partir del dato corregido del número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT, por su sigla en inglés).

**Palabras claves:** resistencia al corte, modelo de Mohr-Coulomb, ángulo de fricción, cohesión, ensayo de corte directo, ensayo dinámico de penetración estándar, retroanálisis, correlación y regresión de datos.

## Abstract

Shear strength is a parameter that is strongly influenced by the conditions of the natural terrain. One of the most influential parameters is the water content which varies according to time and material properties. This makes it difficult to obtain representative samples in unsaturated conditions, thus generating distortions in the values of the strength parameters and generating potholes engineering has faced in practice.

The discrepancy of data obtained from laboratory tests and field in relation to the data obtained by analyzing backcalculation is the foundation on which this article was based. Its purpose is to determine a correction factor to the experimental data, allowing a closer glimpse to the actual *in-situ* conditions at the time of failure values. The values obtained in direct shear tests and SPT have allowed to mathematically correlate their results with those calculated by backcalculation analysis. Correlation facilitated obtaining an acceptable approximation of the strength parameters in colluviums deposits, which serve as a reference for future studies of stability in soils of the same features obtained from the corrected data of number of strokes from standard penetration test SPT.

**Keywords:** shear strength, Mohr Coulomb model, friction angle, direct shear test, dynamic standard penetration test, data correlation and regression.

## INTRODUCCIÓN

La resistencia al esfuerzo cortante es un parámetro que está fuertemente influenciado por las condiciones *in situ*, por factores ambientales tales como carga y descarga y particularmente por el contenido de agua en su masa, el cual varía con el tiempo. Esta situación altera los valores de las condiciones reales de los suelos en el momento de la falla, en comparación con la condición posterior en el momento en que se ejecute el muestreo, para un posterior análisis.

El contenido de agua o grado de saturación presente en una muestra de suelo es un factor que influye directamente en los valores de resistencia de éste, generando alteraciones en los resultados de dicho parámetro, por lo que puede producir distorsión en el análisis de resistencia de las muestras y, directamente, consideraciones erróneas en los análisis de estabilidad y diseños geotécnicos.

La anterior ambigüedad en la determinación de valores de parámetros de resistencia representativos para realizar análisis geotécnicos ha venido siendo uno de los baches que la profesión ha tenido que afrontar en la práctica; actualmente, este problema merece abordarse, con el fin de optimizar y permitir al ingeniero geotecnista incrementar herramientas que permitan emitir conceptos más precisos de índole directa de su profesión.

La presente investigación es motivada por la discrepancia de datos de los parámetros de resistencia al corte obtenidos mediante el ensayo de penetración estándar y ensayo de corte directo, en comparación con los arrojados en un análisis de retrocálculo. Lo anterior es el fundamento de partida para establecer un factor de corrección a los datos experimentales que permitan determinar valores reales de comportamiento *in situ* de depósitos de coluviones en el momento de la falla, como los datos arrojados por el retrocálculo.

Se tiene como base de datos de análisis estudios geotécnicos realizados al sector de la vía Bogotá - Villavicencio (Geotecnia & Cimentaciones, 2006-2012), en diferentes sitios que han presentado inestabilidad. Los suelos de análisis son depósitos de coluviones que se encuentran sobre suelos residuales o la formación rocosa propiamente dicha. La información de resultados de pruebas de resistencia obtenidos en ensayos de corte directo, ensayos de penetración estándar y datos de retrocálculo fueron la base de análisis de correla-

ción para determinar los factores y gráficas de ajuste a condiciones reales *in situ* de los coluviones de estudio.

## MARCO CONTEXTUAL

La resistencia al corte de un suelo determina factores como la estabilidad de un talud, la capacidad de carga admisible de una cimentación y el empuje de un suelo contra un muro de contención. El conocimiento de la resistencia al corte es requisito indispensable para cualquier análisis relacionado con esta estabilidad de una masa de suelo.

La modelación o representación matemática del fenómeno de falla al cortante de una masa de suelo se realiza utilizando las teorías de la resistencia de materiales. Las rocas y los suelos al fallar al corte se comportan de acuerdo con las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación generalizada de Coulomb, quien planteó a partir de observaciones reales que las tierras tras un muro de contención que se vuelca rompen por deslizamiento a lo largo de una superficie plana inclinada (figura 1).

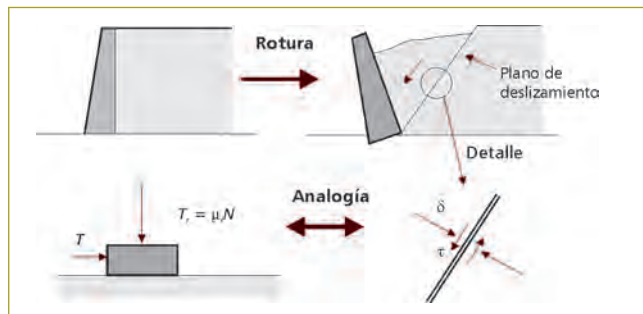


Figura 1. Deslizamiento tras un muro de contención.

El modelo constitutivo de Mohr - Coulomb es considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo. Se trata de un modelo elastoplástico perfecto (isotrópico), desarrollado a partir de la composición de la ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de falla de Mohr - Coulomb.

Coulomb postuló que la resistencia al desplazamiento por unidad de superficie en un plano de falla en el interior de un suelo se debe sólo al rozamiento entre partículas y de ser, por lo tanto, proporcional a la presión normal actuante en dicho plano; igualmente, afirmó que un material falla debido a una combinación crítica

de esfuerzo normal y esfuerzo cortante. Entonces, la relación funcional entre esfuerzo normal y un esfuerzo cortante sobre el plano de falla se expresa así:

$$\tau_f = f(\sigma)$$

El coeficiente de rozamiento se expresa como tangente de un ángulo, que se llama ángulo de rozamiento interno del suelo,  $\theta$ :

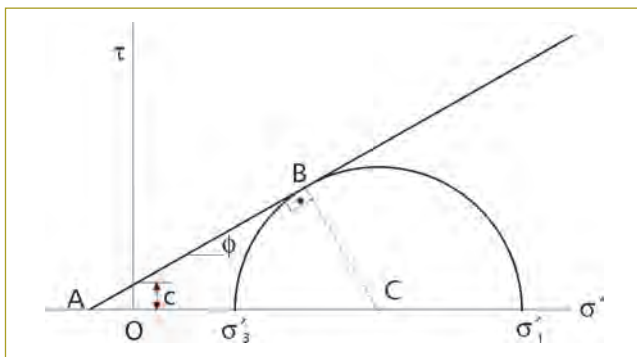
$$\tau_f = \sigma \times \tan \theta$$

La anterior ecuación denota el comportamiento de suelos netamente friccionantes; para suelos con propiedades cohesivas, la ecuación considera una constante independiente adicional, denominada cohesión,  $C$ . Así pues, la resistencia tangencial según un plano vendría dada en el caso general por la expresión:

$$\tau_f = C + \sigma \times \tan \theta$$

La anterior expresión presenta la condición de deslizamiento a lo largo de un determinado plano, en el cual es preciso formular la condición de rotura en términos de los esfuerzos aplicados según los ejes coordenados generales.

Mohr postuló en 1882 que un suelo sometido a cierto estado de esfuerzos produce una plastificación cuando en alguno de los planos que pasan por él los esfuerzos alcanzan a satisfacer la ecuación general, generando movilización o falla de la masa de suelo. La condición de rotura o falla resultante se conoce como criterio de Mohr - Coulomb y se visualiza en forma clara usando el diagrama del círculo de Mohr y la envolvente de falla de Coulomb (figura 2).



**Figura 2.** Diagrama de Mohr - Coulomb. Condición de rotura en dos dimensiones.

La formulación del criterio de Mohr - Coulomb en términos de esfuerzos principales se establece imponiendo la condición de tangencia del círculo de Mohr con la línea de resistencia de Coulomb; de esta forma, el criterio expresa la condición de falla en un estado de esfuerzos determinado.

El principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi modifica la ecuación de Coulomb, ya que su investigación demostró que la resistencia al corte está controlada exclusivamente por los esfuerzos entre partículas del suelo, y para análisis de resistencia hay que excluir el agua presente en la masa de suelo; por lo anterior, la ecuación es modificada por parámetros efectivos y no totales, como inicialmente concibió Coulomb. Investigaciones posteriores identificaron que no sólo la carga influencia el resultado, sino de un modo muy notable la velocidad de aplicación de ella; esto diferencia el tipo de resistencia (“lenta” o “rápida”). La ecuación actual utilizada, que expresa la resistencia de una masa de suelo, es:

$$\tau'_f = c' + \sigma' \times \tan \theta' = c' + (\sigma - \mu) \times \tan \theta'$$

Donde:

$\tau'$  = cortante efectiva

$c'$  = cohesión efectiva

$\sigma'$  = esfuerzo vertical efectivo

$\phi'$  = ángulo de fricción interna efectivo

$\mu$  = presión intersticial o neutral

El modelo de Terzaghi considera que el suelo analizado sólo presenta dos fases (sólido y líquido), es decir, se halla en saturación total, y que la fase vacía se encuentra totalmente ocupada por agua, lo que limita su aplicabilidad para análisis de resistencia en suelos parcialmente saturados, en el cual se debe considerar una masa de suelo trifase (sólido, agua y aire). Lo anterior ha producido investigaciones posteriores que actualmente no son muy generalizadas en el medio geotécnico, y a pesar de que gran parte de los suelos del mundo se encuentran en condición parcialmente saturada, se continúan considerando para análisis condiciones geotécnicas clásicas no fehacientes para las condiciones reales.

Los conceptos de condiciones drenadas y no drenadas enmarcan el comportamiento de los suelos, especialmente en formaciones arcillosas. La condición drenada o no drenada depende de la velocidad con que



el agua puede moverse hacia adentro o hacia fuera en el suelo, comparado con el tiempo, en que el suelo soporta un cambio de carga, si ésta es capaz o no de producir presiones de poro.

Se dice que una condición es drenada cuando el agua es capaz de fluir hacia afuera o hacia adentro de la masa de suelo, esto es, cuando es sometida a una carga y no se producen presiones de poros debido a que el agua se puede mover libremente al aumentar o disminuir el volumen de vacíos como respuesta a un cambio en las condiciones de carga, y una condición es no drenada cuando el agua no es capaz de fluir en el momento en el cual el suelo es sometido a una carga y se produce, entonces, presión de poro, debido a que el agua no se puede mover libremente como respuesta a la tendencia al cambio del volumen de vacíos por acción de la carga y sin dejar de considerar la propiedad incompresible de ésta.

Una masa de suelo saturada manifiesta dos fases distintas: el esqueleto de partículas y los poros entre partículas llenos de agua. Cualquier esfuerzo impuesto sobre el suelo es soportado por el esqueleto de partículas y también por la presión en el agua. Típicamente, el esqueleto puede transmitir esfuerzos normales y de corte por los puntos de contacto entre partículas y el agua a su vez puede ejercer una presión hidrostática, la cual es igual en todas las direcciones. Los esfuerzos ejercidos solamente por el esqueleto se conocen como esfuerzos efectivos y los esfuerzos hidrostáticos del agua se denominan presión de poros.

Los esfuerzos efectivos son los que controlan el comportamiento del suelo y no los esfuerzos totales. En problemas prácticos, el análisis con esfuerzos totales podría utilizarse en problemas de estabilidad a corto plazo y las presiones efectivas para analizar la estabilidad a largo plazo.

La resistencia al corte de un suelo resulta de la resistencia a la fricción que tiene lugar en los puntos de contacto entre partículas y, como tal, su valor depende sólo de la magnitud de los esfuerzos efectivos que actúan en el esqueleto del suelo; cuanto mayor sea la presión entre las partículas, mayor será la resistencia al corte. Sin embargo, para el caso especial de arcillas saturadas, donde los esfuerzos cambian de tal manera que causan una falla potencial por cortante que se produce en condiciones no drenadas, el suelo presenta valores únicos de parámetros en esfuerzos totales  $C_u > 0$  y  $\phi_u = 0$ , lo cual sugiere que los esfuerzos totales pueden

utilizarse como opciones para analizar la falla potencial por cortante en condiciones no drenadas.

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere pre-definir los parámetros, ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo, las cuales se pueden determinar en ensayos de corte en el laboratorio o estimarse mediante ensayos de campo.

## CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS DE ESTUDIO

Los suelos de estudio de la presente investigación se encuentran localizados en la carretera que comunica las ciudades de Bogotá y Villavicencio. Se ubica sobre el flanco oriental de la cordillera Oriental y corta transversalmente rocas metamórficas y sedimentarias con edades del Precámbrico y Paleozoico, cubiertas parcialmente por depósitos cuaternarios que están conformados por materiales *in situ* y transportados asociados a procesos morfodinámicos y antrópicos, relacionados con la modificación del relieve.

Los suelos residuales que se encuentran en el horizonte más superficial de las formaciones rocosas están compuestos por materiales muy meteorizados y fracturados, cuyas propiedades geomecánicas son más bajas que las propiedades de su roca parental; se trata de un material heterogéneo, compuesto por arcillas de color gris, con gravas de lutitas muy meteorizadas de diferentes tamaños. Presentan una consistencia suelta a medio firme que es transicional en profundidad hasta alcanzar la roca. Estos últimos se encuentran generalmente cubiertos por depósitos recientes de coluvión, constituyendo una zona de debilidad que facilita los procesos de inestabilidad.

Los depósitos de coluvión están compuestos por materiales heterogéneos no consolidados de mezcla de clastos de lutitas en una matriz que varía de limosa a arcillosa, provenientes de fenómenos de remoción en masa y la erosión del saprolito y suelo residual en las partes topográficamente más altas, transportados ladera abajo por acción de la gravedad y en presencia o no de agua. El depósito está conformado por bloques heterométricos y clastos angulares de areniscas cuarzosas y, en menor proporción, de lodolitas meteorizadas de color gris oscuro, embebidos en una matriz de limo arenosa a arcillosa, predominando la proporción de matriz sobre los clastos (matriz soportado).

Geomorfológicamente, las áreas adyacentes al corredor vial están controladas en forma estructural por la unidad de origen denudacional, lo que se refleja directamente en la litología predominante, conformada por rocas lodosas, que presenta una morfología ondulada con pendientes moderadas a bajas y relieve de aspecto suavizado, modelado coluvial, originado a partir de procesos morfodinámicos como deslizamientos y flujos de tierra, principalmente.

## METODOLOGÍA Y DESARROLLO

De estudios previos inherentes a problemas de inestabilidad realizados a los suelos de la zona de influencia se hizo una escogencia de 26 sitios, que aportaron un total de 133 muestras representativas, en variedad de profundidades, con una característica en común: estaban localizadas en puntos de falla. El proceso de inestabilidad generalmente se atribuyó al incremento de la presión de poros, derivada por alta pluviosidad e infiltración de agua en la masa de suelo, causando consecuentemente la reducción de la resistencia al corte.

Todas las muestras representativas se trataron de depósitos cuaternarios (coluviones, aluviones y rellenos antrópicos), con un grado de permeabilidad mayor que el estrato que los soportara, generalmente saprolito o suelos residuales derivados de la formación o la formación rocosa propiamente dicha, lo que contribuyó a que el mecanismo de movilización se facilitara en los materiales de menor rigidez sobre los de mayor rigidez.

Partiendo de la caracterización geotécnica de los coluviones estudiados, éstos se dividieron en seis grupos, según la clasificación unificada de suelos USCS (figura 3).

Se planteó analizar mediante correlación estadística de datos de resistencia, obtenidos por varias metodologías (ensayos de corte directo, ensayo de penetración estándar y retrocálculo), con el fin de determinar el grado aceptable de asociación entre variables, medido por el coeficiente de correlación, parámetro que permitió determinar la confiabilidad o validez de la relación entre datos. Las variables consideradas en los análisis fueron ángulo de fricción, cohesión y número de golpes corregido del SPT.

Es importante anotar las condiciones consideradas de drenaje para cada una de las metodologías en la determinación de los parámetros de resistencia. Son de

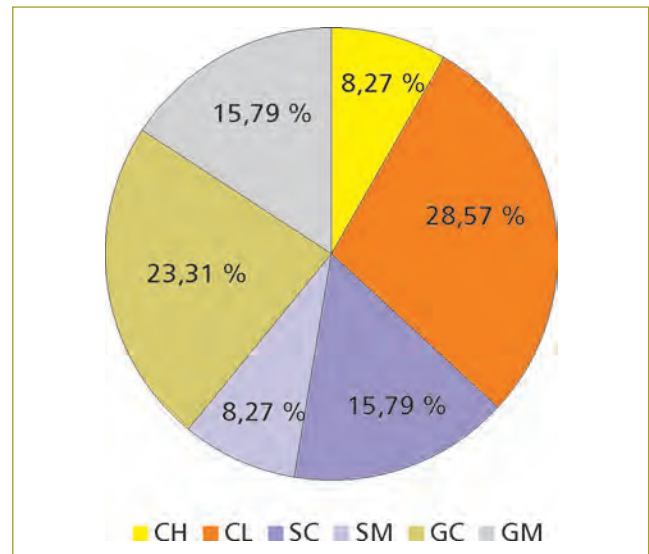


Figura 3. Peso porcentual de muestras por tipo de material.

carácter drenado en los datos de retrocálculo y SPT, a diferencia de los datos suministrados por el ensayo de corte directo, los cuales se concibieron en su totalidad en condiciones de no drenaje, ensayos rápidos UU.

## CORRELACIÓN Y REGRESIÓN LINEAL DE DATOS

Preliminarmente se hicieron los diagramas de dispersión entre variables, donde se evidenció que las variables que mayor grado de asociación presentaron fueron el número corregido de golpes del SPT y los valores de ángulo de fricción, determinados en ensayos de corte directo, correlaciones del SPT y datos del retrocálculo. Aplicado el método de regresión lineal, se obtuvieron tres ecuaciones por tipo de material (cuadro 1).

El método de regresión lineal, *a priori*, manifiesta no ser el más adecuado; se observa que los coeficientes de correlación de algunos de los conjuntos de datos se encuentran por debajo de 0,7, es decir, presentan una correlación pobre de confiabilidad baja, sin dejar de considerar que la tendencia generalizada de los datos es favorable. Más adelante se propuso una alteración al análisis entre variables que permitió encontrar curvas de mejor ajuste de carácter no lineal que mostraron un mejor índice de correlación, que incrementó el índice de confiabilidad en la aplicación del método.

Las curvas lineales determinadas por las ecuaciones anteriores permitieron evidenciar la forma generalizada en que discrepan los datos arrojados por distintas metodologías de obtención del ángulo de fricción (figura 4).

**Cuadro 1**  
Ecuaciones y coeficientes de correlación lineal

Material	1. Retroanálisis		2. SPT		3. CD	
	R <sup>2</sup>	Ecuación	R <sup>2</sup>	Ecuación	R <sup>2</sup>	Ecuación
CH	0,73	$\phi' = 0,401N_c + 12,70$	0,60	$\phi' = 0,216 N_c + 25,93$	0,62	$\phi' = 0,298 N_c + 17,62$
CL	0,69	$\phi' = 0,447 N_c + 12,40$	0,63	$\phi' = 0,244 N_c + 25,26$	0,63	$\phi' = 0,352 N_c + 17,04$
SC	0,62	$\phi' = 0,529 N_c + 10,62$	0,67	$\phi' = 0,282 N_c + 25,26$	0,66	$\phi' = 0,372 N_c + 17,28$
SM	0,83	$\phi' = 0,619 N_c + 9,30$	0,76	$\phi' = 0,294 N_c + 25,00$	0,75	$\phi' = 0,450 N_c + 15,91$
GC	0,76	$\phi' = 0,678 N_c + 8,60$	0,94	$\phi' = 0,320 N_c + 24,36$	0,65	$\phi' = 0,514 N_c + 13,82$
GM	0,86	$\phi' = 0,774 N_c + 7,48$	0,91	$\phi' = 0,360 N_c + 23,63$	0,76	$\phi' = 0,604 N_c + 13,30$

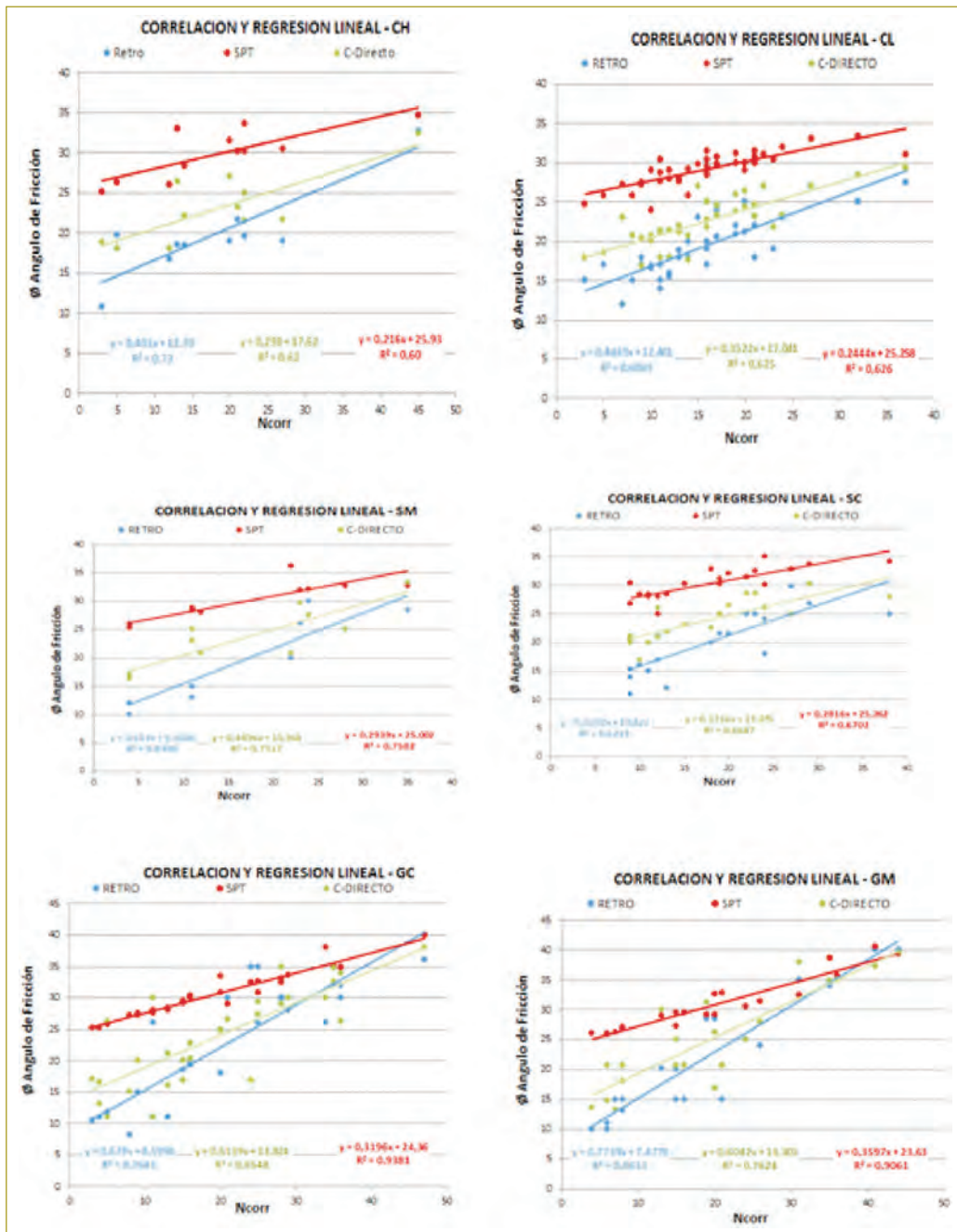
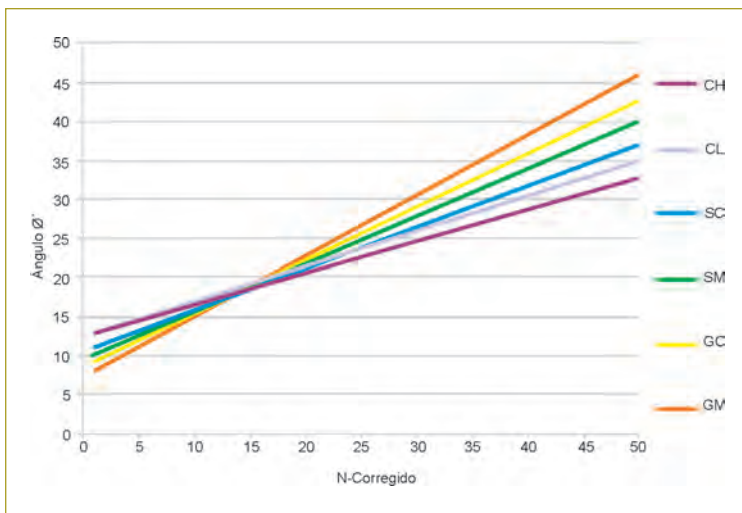


Figura 4. Correlación y regresión lineal de datos.

La tendencia generalizada a que los datos de retroanálisis se encuentren por debajo de los datos arrojados por las dos metodologías comparadas es congruente, ya que el modelo de retroanálisis considera condiciones críticas de falla con un factor de seguridad uno ( $F=1$ ), el cual fue determinado con base en variedad de combinaciones de parámetros de resistencia ( $c'$  y  $\phi'$ ), al igual que condiciones de relación de presión de poros específicas, que condujeron a asumir la combinación más crítica o desfavorable.

Por otro lado, los parámetros de resistencia de los suelos, obtenidos en ensayos de laboratorio, pueden generar incertidumbre en el análisis de estabilidad debido a que las propiedades *in situ* del suelo en el momento del muestreo pueden no ser las mismas en el momento de la falla; además, pueden variar a la manipulación de éstas y a la anisotropía del suelo. Las curvas resultado de las ecuaciones de la columna 1, en función de  $N$  corregido, permiten determinar en forma directa el ángulo de fricción efectivo, para cada tipo de suelo considerado (figura 5).



**Figura 5.** Ángulo de fricción efectivo en función de  $N$  corregido. Método lineal.

Un aspecto de gran relevancia, que se evidencia en el análisis de correlación, es la marcada tendencia que existe según la clasificación de los materiales; se observan pendientes más pronunciadas para materiales con mayor contenido de partículas gruesas (GM, GC, SM), respecto a los materiales con contenido de partículas más finas (CH, CL, SC), por lo que se infiere que el

contenido de partículas finas reduce el coeficiente de fricción en una masa de suelo

Los valores promedio de ángulo de fricción efectivo, arrojados por las curvas por tipo de material fueron  $23,73^\circ$  en CH,  $24,69^\circ$  en CL,  $25,18^\circ$  en SC,  $26,33^\circ$  en SM,  $27,25^\circ$  en GC,  $28,76^\circ$  en GM. Valores que caracterizan particularmente los coluviones de estudio.

## CORRELACIÓN Y REGRESIÓN NO LINEAL DE DATOS

Partiendo de la incertidumbre generada por la dispersión considerable de los datos en la correlación realizada inicialmente, referente al bajo nivel de correlación " $r^2$ ", se evaluó el grado de dispersión de los datos respecto al valor medio de la ecuación de regresión de mejor ajuste, es decir, se optó por realizar una nueva correlación, variando exclusivamente la variable dependiente, haciendo la relación ángulo de fricción /  $N$  corregido. Esto generó una nueva tendencia de los datos correlacionados, enmarcando la curva de mejor ajuste con una tendencia potencial, presentando valores de coeficiente de correlación superiores al análisis lineal. Se obtuvieron tres ecuaciones por tipo de material, similar al primer método (cuadro 2).

Con la modificación de la variable dependiente se evidencia enormemente el incremento de los coeficientes de correlación, quedando por encima de 0,90 el 66 % de los datos, rango de excelente asociación. Las curvas no lineales permiten evidenciar en forma generalizada la discrepancia entre datos arrojados por distintas metodologías en la obtención del ángulo de fricción interno.

En la figura siguiente se presenta el comportamiento de los datos aplicando la variación de la variable dependiente, donde se aprecia un comportamiento no lineal de característica potencial (figura 6).

El método no lineal igualmente evidencia la discrepancia por exceso entre datos obtenidos en corte directo y SPT con el retrocálculo. Se observa que los datos promedio de las curvas de corte directo y STP se encuentran por arriba el 8 y el 31 %, respectivamente.

A partir de la regresión no lineal se establecieron las ecuaciones y curvas resultado, que permiten determinar en forma directa el ángulo de fricción efectivo en función del dato de  $N$  corregido.

Consecuente con el método lineal, las curvas presentan mayor pendiente proporcional al contenido de



**Cuadro 2**  
 Coeficientes de correlación y ecuaciones de regresión no lineal en función de *N* corregido

Material	1. Retroanálisis		2. SPT		3. CD	
	R <sup>2</sup>	Ecuación	R <sup>2</sup>	Ecuación	R <sup>2</sup>	Ecuación
CH	0,92	$\sigma'/N_c = (9,16 * N_c - 0,72)$	0,99	$\sigma'/N_c = (21,81 * N_c - 0,89)$	0,96	$\sigma'/N_c = (14,30 * N_c - 0,83)$
CL	0,89	$\sigma'/N_c = (8,43 * N_c - 0,69)$	0,98	$\sigma'/N_c = (20,79 * N_c - 0,87)$	0,95	$\sigma'/N_c = (12,77 * N_c - 0,79)$
SC	0,62	$\sigma'/N_c = (6,935 * N_c - 0,61)$	0,98	$\sigma'/N_c = (18,68 * N_c - 0,83)$	0,93	$\sigma'/N_c = (10,27 * N_c - 0,70)$
SM	0,90	$\sigma'/N_c = (5,87 * N_c - 0,56)$	0,99	$\sigma'/N_c = (20,95 * N_c - 0,86)$	0,97	$\sigma'/N_c = (11,67 * N_c - 0,74)$
GC	0,69	$\sigma'/N_c = (4,55 * N_c - 0,46)$	0,99	$\sigma'/N_c = (19,80 * N_c - 0,84)$	0,82	$\sigma'/N_c = (9,10 * N_c - 0,67)$
GM	0,69	$\sigma'/N_c = (3,86 * N_c - 0,40)$	0,98	$\sigma'/N_c = (18,39 * N_c - 0,82)$	0,84	$\sigma'/N_c = (7,61 * N_c - 0,59)$

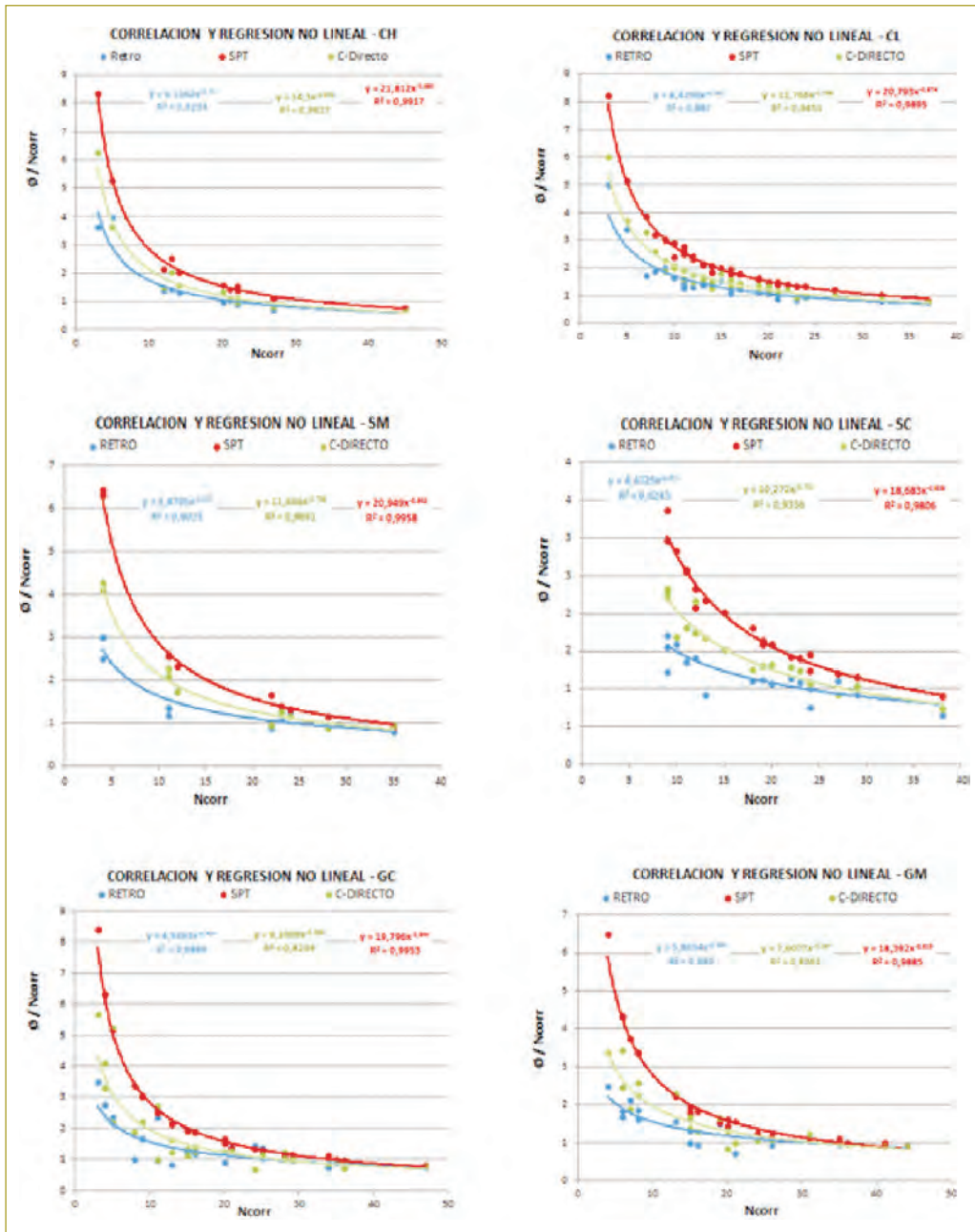
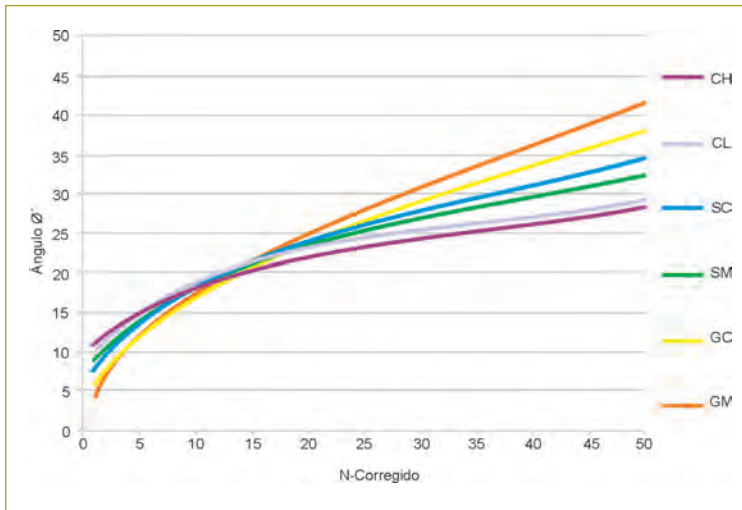


Figura 6. Correlación y regresión no lineal de datos.

partículas gruesas. En la tendencia que dibujan las curvas, a partir de  $N$  corregido de 14, se evidencia que los materiales se agrupan marcadamente según el tamaño predominante de sus partículas, arcillas, limos, arenas y gravas (figura 7).



**Figura 7.** Ángulo de fricción efectivo en función de  $N$  corregido. Método no lineal.

Las curvas arrojaron valores promedio de ángulo de fricción efectivo levemente menores que los determinados por el método lineal por tipo de suelo. Los valores fueron  $22,33^\circ$  en CH,  $22,52^\circ$  en CL,  $24,14^\circ$  en SC,  $24,58^\circ$  en SM,  $25,77^\circ$  en GC,  $27,48^\circ$  en GM. Valores que caracterizan particularmente los coluviones de estudio.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Mediante el análisis de la presente investigación se buscó encontrar factores de ajuste a los parámetros de resistencia, con el fin de determinar valores representativos de las condiciones *in situ* de los suelos, debido a la gran incertidumbre causada por la discrepancia entre los valores obtenidos en los ensayos de SPT y corte directo respecto a los de retrocálculo.

En busca del objetivo se implementó un análisis de correlación estadística de datos, lo cual permitió evidenciar una gran dispersión entre algunos parámetros y relaciones aceptables en otros. Se realizó el análisis previo de variables de correlación y se determinó como variable dependiente el número de golpes corregido del ensayo SPT, por su buen grado de ajuste entre los valores de

ángulo de fricción interna arrojados en los ensayos de corte directo, correlaciones de SPT y retrocálculo.

El número de golpes corregido, como variable independiente, y los valores ángulo de fricción interna, obtenidos de ensayos de corte directo, SPT, y retrocálculo, reportaron grados de asociación aceptable, lo que permitió continuar en el análisis de datos y consecución de las gráficas de ajuste, sin dejar de considerar el coeficiente de correlación para gran parte de los datos valores de asociación pobre, principalmente en suelos con matriz arcillosa y limosa. Dado lo anterior se hizo un análisis adicional de la dispersión entre datos, variando la variable dependiente, lo que condujo a que la dispersión de los datos tomar una tendencia no lineal en su mejor ajuste, en el cual los valores de coeficiente de correlación mostraron un incremento considerable

Se realizaron las correlaciones y regresiones del caso, que evidenciaron la justificación de la presente investigación; se encontró que de manera generalizada los datos de los ensayos discrepan de los datos de retrocálculo, siendo los valores del SPT los que se alejan, seguidos de los datos del corte directo. Los datos de retrocálculo en todos los casos reportaron valores menores.

Los datos del SPT, pese a que se encuentran castigados por un sinnúmero de correcciones (confinamiento y eficiencia y características del equipo), reportaron valores promedio superiores en un 26 y 31 % en cada uno de los métodos desarrollados lineal y no lineal, respectivamente. Este desfase presentó menor magnitud en coluviones con contenido de matriz granular y aumentó proporcionalmente con suelos de contenido limoso y arcilloso; esto último es consecuencia de una de las limitaciones del ensayo, el cual está concebido para desarrollarse en suelos granulares y el grado de ser representativo disminuye en suelos de contenido fino.

Los datos de corte directo reportaron valores promedio superiores al 7 y 8 % en los métodos desarrollados lineales y no lineales, respectivamente, sin dejar de considerar la condición no drenada de los datos suministrados; dicha condición se puede cuestionar en los materiales granulares, ya que es posible que en la ejecución del ensayo permitan un drenaje parcial, produciendo disipación intersticial que distorsiones los datos arrojados. Lo anterior se puede afirmar teniendo como soporte la limitación del ensayo en medir presión de poros en el momento del corte.

Las curvas derivadas en los métodos aplicados evidencian que los materiales ganan más valor de ángulo de fricción efectivo a medida que el contenido de material fino disminuye, cuando  $N$  corregido aumenta. Las curvas resultado corresponden a materiales de composición mixta, es decir, se trata de suelos heterogéneos embebidos en una matriz de composición limosa o arcillosa, que altera sustancialmente el parámetro de resistencia.

Las ecuaciones y gráficas resultado se pueden utilizar para estimar el parámetro de fricción en suelos caracterizados como coluviones. Sin embargo, las pruebas *in situ* y los ensayos de laboratorio no dejarán de ser las principales fuentes de caracterización en el análisis geotécnico.

Es necesario tener muy presente que los parámetros de corte de un suelo dependen de una serie de factores, tales como el porcentaje en finos y la dispersión de tamaño de gruesos, la estructura de los granos, plasticidad, humedad y composición química, factores que no se han tenido en cuenta para la construcción de las ecuaciones resultado, debido a la complejidad del tema y el grado de heterogeneidad de los materiales de estudio.

En consecuencia, debemos concluir que las fórmulas propuestas en el presente documento no son más que aproximaciones que se pueden consultar como referencia en futuros estudios geotécnicos en suelos definidos como coluviones, con características similares a los estudiados.

## REFERENCIAS

- Badillo, J. & Rico, R. (1988). *Mecánica de suelos*, tomo 1. México: Limusa S.A. de C.V.- Noriega Editores.
- Berry, P. (1993). *Mecánica de suelos*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Bowles, J. (1988). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill Book Co.
- Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México: Thomson Editores S.A. de C.V.
- Duncan, J. (2005). *Soil strength and slope stability*.
- Gallant, A. (1986). *Nonlinear Regression. The American Statistician*. Nueva York: John Wiley & Sons.
- González, A. (1999). *Resistencia efectiva con SPT*.
- Holtz, R. & Kovacs, W. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Nueva Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Inviás (1998). *Manual de estabilidad de taludes*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Liao, S. & Whitman, R. (1986). *Overburden correction factors for SPT in Sand v-112*. JGED ASCE.
- Meyerhof, G. (1957). *Discussion on Sand Density by Spoon Penetration v-3*. Londres.
- Salas, J. (s.f.). *Geotecnia y cimientos II. Mecánica del suelo y de las rocas*. Madrid: Rueda.
- Skempton, A. (1986). *Standard penetration tests*.
- Tang, W., Stark, T. & Angulo, M. (1999). *Reliability in back analysis of slope. Soils and Foundations*.
- Terzaghi, K. P. (1973). *Mecánica de suelos en ingeniería práctica*, 2.ª ed. España: Editorial Ateneo.
- Whitlow, R. (2000). *Fundamentos de mecánica de suelos*. México: Ceca.
- Whitman, T. W.-R. (1994). *Mecánica de suelos*, 10.ª ed. México: Limusa S.A. de C.V.- Noriega Editores.

# Caracterización sísmica de fallas colombianas por analogía con fallas conocidas geológica y sismológicamente

## Seismic characterization of Colombian faults by analogy with geologically and seismically known faults

PAULA MARGARITA HERRERA SUÁREZ<sup>1</sup> - ANDRÉS JOSÉ ALFARO CASTILLO<sup>2</sup>

1. Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Ingeniera de Diseño Ingetec S.A.

2. Ingeniero civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Máster en Ingeniería Sísmica de la Universidad Politécnica de Cataluña. Posgrado en Sismología del International Institute on Seismology and Earthquake Engineering. Japón. Investigador del CIEES

paula.herrera@ingetec.com.co - alfaro@ciees.org

Recibido: 12/02/2014 Aceptado: 15/04/2014

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

### Resumen

Los estudios de amenaza sísmica en Colombia cuentan con vacíos de información debido a dos causas principales: instrumentación sísmica insuficiente en el tiempo y en el espacio, y desconocimiento del comportamiento de las fallas geológicas. Por esta razón, se caracterizaron ciertas fallas que afectan ciudades de Colombia por medio de una analogía geológica y sismológica, con algunas de las fallas geológicas mejor caracterizadas del mundo. Esta analogía se realizó teniendo en cuenta las relaciones empíricas de magnitud-geometría desarrolladas por Wells & Coppersmith (1994), por medio de las cuales puede estimarse la magnitud máxima de un sismo en función de la longitud y el tipo de la falla que lo produce.

Por otro lado, desde el punto de vista sismológico, la estimación de las magnitudes máximas de los sismos producidos por las fallas estudiadas se realizó por medio de la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter y las relaciones magnitud-área de Hanks & Bakun (2008), y Ellsworth (2003). De esta manera, las fallas colombianas que se caracterizaron por medio de la analogía son Buesaco, Cimitarra, Cocora, Cucuana, Garrapatas, Irlanda, Oca, Potrerillos, Sibundoy y Viani; y las fallas bien documentadas utilizadas en esta analogía fueron Shelter Cove, North Coast, Parkfield, Mojave, Borrego Mountain, Coyote Creek, Superstition Hills, Imperial, Emerson, Camp Rock, Owens Valley, Dixie Valley y San Fernando.

**Palabras claves:** analogía, amenaza sísmica, Colombia, falla geológica, relación Gutenberg-Richter.

### Abstract

Hazard analysis studies in Colombia lack information because of two main causes: insufficient seismological data in both time and space and unknown behavior of geological faults. Because of that, some faults that could affect important cities in Colombia were characterized by geological and seismological analogy with some of the most best characterized faults in the world. This analogy was based on the empirical relations of magnitude-geometry developed by Wells y Coppersmith (1994), which magnitude can be estimated depending on a fault's longitude and type.

From the seismological point of view, the estimation of seismic maximum magnitudes produced by faults was assessed by Gutenberg-Richter recurrence law and Hanks & Bakun (2008), and Ellsworth (2003) magnitude-area relations. In such way, the Colombian faults that were characterized are: Buesaco, Cimitarra, Cocora, Cucuana, Garrapatas, Irlanda, Oca, Potrerillos, Sibundoy and Viani. And the best characterized faults that were used in this analogy are: Shelter Cove, North Coast, Parkfield, Mojave, Borrego Mountain, Coyote Creek, Superstition Hills, Imperial, Emerson, Camp Rock, Owens Valley, Dixie Valley and San Fernando.

**Keywords:** analogy, seismic hazard, Colombia, quaternary fault, Gutenberg-Richter relation.



## INTRODUCCIÓN

La amenaza sísmica de Colombia se encuentra enmarcada por la interacción de cuatro placas: placa de Suramérica, del Caribe, Nazca y Cocos, dicha interacción ha generado un gran número de fallas geológicas de diferente tipo y una zona de subducción; de acuerdo con esta complejidad tectónica, Colombia se encuentra ubicada en una zona sísmicamente activa. A pesar de esto, el estudio de la amenaza sísmica en Colombia tiene muchas incertidumbres por la insuficiencia de equipos de medición (sismógrafos, acelerógrafos, GPS y otros), bases de datos incompletas en cuanto a eventos sísmicos y no suficiente caracterización de las fallas geológicas activas.

El estudio y caracterización de las fallas activas es una herramienta fundamental para la evaluación de la amenaza sísmica. Históricamente, el estudio de las fallas activas comprende publicaciones como *Fallas activas de Colombia* (París & Romero, 1994), *Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions* (Paris et al., 2000), *Base de datos de fallas activas de Colombia* (Montes & Sandoval, 2001); también comprenden trabajos de neotectónica realizados para microzonificación de ciudades como Popayán (1992), Manizales (1993), Medellín (1994), Bogotá (1996), Bucaramanga (1997) y Pereira (1998). En la realización de proyectos hidroeléctricos de gran magnitud, también se han hecho estudios interesantes e importantes; sin embargo, mucha de esa literatura es gris, con excepción del libro *Geología sísmica y sismicidad del noroeste de Colombia* (Page, 1986). Pero a pesar de los trabajos anteriormente nombrados, la caracterización de las fallas activas en Colombia aún cuenta con vacíos de información que impiden realizar estudios detallados de amenaza sísmica, lo que repercute directamente en la incertidumbre de evaluaciones de la amenaza sísmica (Alfaro, 2012).

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar algunas fallas colombianas activas a partir de analogías realizadas con fallas bien conocidas en el extranjero por medio de datos geológicos y sismológicos para complementar los registros de las fallas colombianas (Herrera, 2014).

## FALLAS BIEN CARACTERIZADAS

Éstas corresponden a fallas de zonas sísmicamente activas que han sido objeto de estudio mediante sistemas de monitoreo. Las fallas utilizadas en esta investigación

son Shelter Cove, North Coast, Parkfield y Mojave, que pertenecen a la Zona de Falla de San Andrés; las fallas Borrego Mountain, Coyote Creek y Superstition Hills, pertenecientes a la Zona de Falla de San Jacinto; la falla Imperial, perteneciente a la Zona de Falla Imperial, las fallas Emerson y Camp Rock, pertenecientes a Eastern California Shear Zone (ECSZ); también forman parte de esta investigación las fallas Owens Valley, Dixie Valley y San Fernando.

## FALLAS COLOMBIANAS

Las fallas colombianas analizadas en esta investigación enmarcan la amenaza sísmica de las principales ciudades del país; las fallas utilizadas en la analogía fueron Buesaco (perteneciente al Sistema de Fallas Romeral), Cimitarra, Cocora, Cucuana, Garrapatas, Irlanda, Oca, Potrerillos, Sibundoy (perteneciente al Sistema de Falla Oriental Frontal) y Vianí.

## ANALOGÍA

La analogía entre las fallas bien caracterizadas con las fallas colombianas se realizó en dos pasos. El primero fue encontrar fallas colombianas que tuvieran el mismo tipo de movimiento y la misma longitud que las fallas bien caracterizadas; esto debido a que Wells & Coppersmith (1994) señalaron que existe una relación matemática con la cual se puede obtener la magnitud de un sismo en función del tipo y longitud de la falla que lo genere, paso denominado analogía geológica. El segundo paso es la analogía sismológica, que consiste en encontrar la magnitud máxima probable de un sismo para cada una de las fallas estudiadas de conformidad con la ley de Recurrencia de Gutenberg-Richter o mediante las relaciones de magnitud-área de Hank & Bakun (2002) y Ellsworth (2003).

## Analogía geológica

De acuerdo con las características geológicas de las fallas, tales como el tipo (rumbo, normal e inversa), longitud y buzamiento, se hizo una analogía entre las fallas bien documentadas y fallas colombianas descritas anteriormente. El objetivo era encontrar fallas colombianas que fueran del mismo tipo, tuvieran una longitud similar y su buzamiento fuera orientado en

la misma dirección que las fallas bien documentadas. A continuación se resumen los resultados de esta analogía, especificando las características de las fallas colombianas según tres catálogos vigentes (cuadro 1).

**Cuadro 1**  
Analogía geológica entre fallas colombianas y fallas bien documentadas

Parámetro	Falla colombiana			Falla bien documentada (USGS)
	Ingeominas (Montes & Sandoval)	USGS (París)	ISA, Integral, WCC (Page)	
<b>Analogía 1</b>				
Nombre	-	Buesaco	-	Camp Rock
Estado/departamento	-	Nariño	-	California
Tipo	-	Rumbo Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	-	29	-	30
Buzamiento	-	Vertical y W	-	90°
Tasa de movimiento	-	1-5 mm/año	-	0,2 - 1,0 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	5-7 k.y
Sismos asociados año/magnitud	-	1995/6,1	-	1992/7,3
<b>Analogía 2</b>				
Nombre	Cimitarra	Cimitarra	Cimitarra	Dixie Valley
Estado/departamento	Antioquia	Antioquia	Antioquia	Nevada
Tipo	Normal	Inversa - Sinistra	Normal	Normal
Longitud (km)	45	136,7	>50	57
Buzamiento	Este	-	-	30° E a 80° E
Tasa de movimiento	0,01-0,1 mm/año	<0,2 mm/año	-	0,2 - 1,0 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	15-50 ka
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1954/6,8
<b>Analogía 3</b>				
Nombre	Cocora	-	-	Superstition Hills
Estado/departamento	Quindío - Tolima	-	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	-	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	37	-	-	38
Buzamiento	90°	-	-	90°
Tasa de movimiento	0,1-1 mm/año	-	-	1-5 mm/año
Intervalo de recurrencia	1000-20000 años	-	-	250 (+400, -133)
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1951/5,1 1987/6,6
<b>Analogía 4</b>				
Nombre	Cucuana	Cucuana	-	Shelter Cove
Estado/departamento	Tolima	Tolima	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	54	142,1	-	138
Buzamiento	Vertical	Vertical	-	90°
Tasa de movimiento	0,1-1 mm/año	<0,2 mm/año	-	14 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	600-6000 años	-	-
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1906/7,9
<b>Analogía 5</b>				
Nombre	Garrapatas	Garrapatas	Garrapatas	Mojave
Estado/departamento	Chocó	Chocó	Chocó	California
Tipo	Rumbo Diestra	Inversa - Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	104	140,7	75	112

Parámetro	Falla colombiana			Falla bien documentada (USGS)
	Ingeominas (Montes & Sandoval)	USGS (París)	ISA, Integral, WCC (Page)	
Buzamiento	-	50° NW	-	90°
Tasa de movimiento	-	<0,2 mm/año	-	16-38 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	100-135 años
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1858/7,7-7,9
Observaciones	Potencialmente activa			
<b>Analogía 6</b>				
Nombre	Irlanda	Irlanda	-	Imperial
Estado/departamento	Cauca - Huila	Cauca - Huila	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	41	54,7	-	46
Buzamiento	Vertical a 82° sureste	90°	-	90°
Tasa de movimiento	-	<0,2 mm/año	-	Más de 5 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	40(+24,-17) años
Sismos asociados año/magnitud	1994/6,4	1994/6,4	-	1940/7,2 1979/6,6
<b>Analogía 7</b>				
Nombre	Irlanda	Irlanda	-	Coyote Creek
Estado/departamento	Cauca - Huila	Cauca - Huila	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	41	54,7	-	44
Buzamiento	Vertical a 82° sureste	90°	-	90°
Tasa de movimiento	-	<0,2 mm/año	-	1-5 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	175 (+158, -95)
Sismos asociados año/magnitud	1994/6,4	1994/6,4	-	1969/5,8
<b>Analogía 8</b>				
Nombre	Oca	Oca	Oca	Shelter Cove
Estado/departamento	La Guajira	La Guajira	La Guajira	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra
Longitud (km)	137	267	250	138
Buzamiento	-	-	-	90°
Tasa de movimiento	0,01-1 mm/año	0,2-1 mm/año	-	14 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	-
Sismos asociados año/magnitud	-	1833/-	-	1906/7,9
<b>Analogía 9</b>				
Nombre	Oca	Oca	Oca	North Coast
Estado/departamento	La Guajira	La Guajira	La Guajira	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra
Longitud (km)	137	267	250	244
Buzamiento	-	-	-	90°
Tasa de movimiento	0,01-1 mm/año	0,2-1 mm/año	-	16 - 25 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	200-400 yr
Sismos asociados año/magnitud	-	1833/-	-	1906 /7,9
<b>Analogía 10</b>				
Nombre	Oca	Oca	Oca	Owens Valley
Estado/departamento	La Guajira	La Guajira	La Guajira	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra
Longitud (km)	137	267	250	118
Buzamiento	-	-	-	80° ± 15° noreste-este

Parámetro	Falla colombiana			Falla bien documentada (USGS)
	Ingeominas (Montes & Sandoval)	USGS (París)	ISA, Integral, WCC (Page)	
Tasa de movimiento	0,01-1 mm/año	0,2-1 mm/año	-	De 1 a 5 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	3,3 a 9,2 k.y
Sismos asociados año/magnitud	-	1833/-	-	1872/7,5
<b>Analogía 11</b>				
Nombre	Potrerillos	-	-	San Fernando
Estado/departamento	Risaralda	-	-	California
Tipo	Inversa -Siniestral	-	-	Inversa -Siniestral
Longitud (km)	23	-	-	23
Buzamiento	70° E	-	-	40° NE
Tasa de movimiento	0,1-1 mm/año	-	-	5 mm/año
Intervalo de recurrencia	1000 a 3000 años	-	-	-
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1971/6,7
Observaciones	Falla potencialmente activa	-	-	
<b>Analogía 12</b>				
Nombre	Sibundoy	Sibundoy	-	Emerson
Estado/departamento	Putumayo - Nariño	Putumayo - Nariño	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Rumbo Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	50	58,5	-	61
Buzamiento	Oeste	Vertical, con componente alto al oeste	-	90°
Tasa de movimiento	-	1,0 - 5,0 mm/año	-	0,2 - 1,0 mm/año
Intervalo de recurrencia	-	-	-	7,4-12 k.y
Sismos asociados año/magnitud	1834	1834	-	1992/7,3
<b>Analogía 13</b>				
Nombre	Vianí	Vianí	-	Parkfield
Estado/departamento	Cundinamarca	Cundinamarca	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Inversa Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	36	39,6	-	32
Buzamiento	90°	De bajo a medio hacia el sureste	-	90°
Tasa de movimiento	0,01-0,1 mm/año	0,01-0,1 mm/año	-	Más de 5 mm/año
Intervalo de recurrencia	30000-50000 años	10-100 ky	-	Varía según el tipo de sismo de 22 a 40 años
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1966/6,25 2004/6,0
Observaciones	Potencialmente activa	-	-	-
<b>Analogía 14</b>				
Nombre	Vianí	Vianí	-	Borrego Mountain
Estado/departamento	Cundinamarca	Cundinamarca	-	California
Tipo	Rumbo Diestra	Inversa Diestra	-	Rumbo Diestra
Longitud (km)	36	39,6	-	34
Buzamiento	90°	De bajo a medio hacia el sureste	-	80° NE
Tasa de movimiento	0,01-0,1 mm/año	0,01-0,1 mm/año	-	1-5 mm/año
Intervalo de recurrencia	30000-50000 años	10-100 ky	-	175 años
Sismos asociados año/magnitud	-	-	-	1968/6,6
Observaciones	Potencialmente activa	-	-	-

Fuente: Herrera, 2014.



### Analogía sismológica

Como se indicó anteriormente, la analogía sismológica se realiza teniendo en cuenta la magnitud máxima de un sismo para las fallas estudiadas. El cálculo de la magnitud máxima se puede hacer de dos maneras: para fallas que no se encuentran entrelazadas con otras fallas este valor se calcula por medio de la ley de recurrencia de Gutenberg-Richter, mientras que para las fallas que sí están unidas a otras fallas el cálculo de la magnitud máxima probable de un sismo se hace por medio de las relaciones de magnitud-área de Hank & Bakun (2002) y Ellsworth (2003).

Según esto, sólo para cinco fallas bien documentadas fue posible el uso de la ley de recurrencia Gutenberg-Richter porque su comportamiento era independiente de las fallas vecinas; el resto de las fallas bien documentadas se analizaron por medio de las relaciones magnitud-área. En el caso de las fallas colombianas, todas se analizaron por medio de la ley de recurrencia Gutenberg-Richter porque el parámetro del área de las fallas no se ha definido.

#### Magnitud máxima de un sismo en el caso de las fallas bien documentadas

##### a. Mediante la ley de recurrencia Gutenberg-Richter

De conformidad con lo descrito anteriormente, el cálculo de los parámetros de Gutenberg-Richter se realizó sólo para las fallas Imperial, Superstition Hills, Owens Valley, Dixie Valley y San Fernando, debido que son fallas que no se encuentran unidas a las fallas que las

rodean. Es muy importante aclarar que en el cálculo de los parámetros de Gutenberg-Richter realizado por la USGS no se incluyen los sismos con magnitud mayor de 6,5 por ser sismos extemporáneos, lo que llaman método Gutenberg-Richter “truncado”. En este caso se mostrarán los parámetros calculados con el método Gutenberg-Richter “original” y con el método “truncado” (cuadro 2).

##### b. Mediante las relaciones magnitud-área de Hank & Bakun (2002) y Ellsworth (2003)

Teniendo en cuenta el valor del área de cada una de las fallas estudiadas, se calculó la magnitud máxima de un sismo utilizando las relaciones matemáticas de Hank & Bakun (2002) y Ellsworth (2003) (cuadro 3). Como se puede apreciar los valores calculados por el USGS coinciden perfectamente con los calculados por el autor.

#### Magnitud máxima de un sismo en el caso de las fallas colombianas

Debido a que los estudios efectuados a las fallas colombianas no incluyen el valor del área de falla ni los parámetros para calcularlas, el cálculo de la magnitud máxima probable para todas las fallas se realizó por medio de la ley de recurrencia Gutenberg-Richter. Se incluyen los parámetros  $a$  y  $b$ , junto con la magnitud máxima, así como las magnitudes máximas calculadas para cada una de las fallas en el Estudio General de Amenaza Sísmica correspondiente a los años 1997 y 2009 (cuadro 4).

**Cuadro 2**

Magnitud y parámetros de Gutenberg-Richter para las fallas Imperial, Superstition Hills, Owens Valley, Dixie Valley y San Fernando

Falla	Parámetros Gutenberg - Richter (Herrera, 2014)						Parámetros Gutenberg - Richter (USGS)		
	"Original"			"Truncado"			"Truncado"		
	a	b	M	a	b	M	a	b	M
Imperial	5,32	0,86	6,18	5,95	1,02	5,83	3,03	0,80	3,79
Superstition Hills	3,45	0,55	6,32	4,13	0,72	5,71	2,46	0,80	3,08
Owens Valley	2,75	0,38	7,17	4,68	0,86	5,45	1,86	0,80	2,32
Dixie Valley	1,94	0,31	6,29	6,35	1,49	4,27	2,05	0,80	2,56
San Fernando	1,93	0,30	6,37	5,91	1,39	4,24	2,28	0,80	2,85

$a$  y  $b$  = parámetros Gutenberg Richter

M = Magnitud.

Fuente: Herrera, 2014

**Cuadro 3**

Magnitudes de las fallas bien documentadas, calculadas con el método de Ellsworth (2003) y Hanks &amp; Bakun (2002)

Falla	Área (USGS)	Magnitud Ellsworth (USGS)	Magnitud Hanks & Bakun (USGS)	Magnitud Ellsworth (Herrera P.)	Magnitud Hanks y Bakun (Herrera P.)
Shelter Cove	1469,90	7,37	7,29	7,37	7,29
North Coast	2044,40	7,51	7,48	7,51	7,48
Parkfield	78,00	6,09	5,87	6,09	5,87
Mojave	268,00	6,63	6,41	6,63	6,41
Borrego Mountain	403,60	6,81	6,59	6,81	6,59
Coyote Creek	681,50	7,03	6,85	7,03	6,85
Superstition Hills	410,30	6,80	6,60	6,81	6,59
Imperial	607,20	7,00	6,80	6,98	6,78
Emerson	499,68	6,90	6,68	6,90	6,68
Camp Rock	245,74	6,59	6,37	6,59	6,37
Owens Valley	1156,90	7,30	7,20	7,26	7,15
San Fernando	332,60	6,70	6,50	6,72	6,50

La ecuación de Ellsworth utilizada es la B.

Fuente: Herrera, 2014.

**Resultado de analogía sísmológica**

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se muestran los resultados de la analogía sísmológica entre fallas colombianas y fallas bien documentadas (cuadro 5).

**CONCLUSIONES**

Los valores obtenidos de magnitudes máximas para fallas colombianas y para fallas bien documentadas varían de acuerdo con el número de datos utilizados y con la metodología. La ley de recurrencia de Gutenberg-

**Cuadro 4**

Parámetros Gutenberg-Richter para fallas colombianas y magnitudes máximas, según Gutenberg-Richter y el Estudio General de Amenaza Sísmica

Falla	Parámetros Gutenberg-Richter (Herrera, 2014)						Estudio General de Amenaza Sísmica (AIS)	
	"Original"			"Truncado"			1997	2009
	a	b	M	a	b	M	M	M
Buesaco	1,38	0,20	6,83	2,05	0,39	5,19	7,60*	7,60*
Cimitarra	2,80	0,49	5,66	NA	NA	NA	6,50	6,50
Cocora	2,77	0,47	5,84	NA	NA	NA	6,50*	6,90*
Cucuana	2,91	0,45	6,41	NA	NA	NA	-	-
Garrapatas	4,61	0,76	6,10	NA	NA	NA	6,50	6,50
Irlanda	2,61	0,40	6,44	4,19	0,79	5,30	-	-
Oca	-	-	-	-	-	-	7,40	6,50
Potrerrillos	2,41	0,48	5,04	NA	NA	NA	-	-
Sibundoy	-	-	-	-	-	-	8,00*	8,00*
Viani	2,99	0,59	5,03	NA	NA	NA	-	-

a y b = parámetros Gutenberg-Richter.

M = magnitud máxima.

\*El Estudio General de Amenaza Sísmica de los años 1997 y 2009 no asigna una magnitud máxima para estas fallas específicamente. Para la falla de Buesaco se toma un valor de 7,60 debido a que este estudio indica ese valor para todas las fallas pertenecientes al sistema de Romeral; lo mismo ocurre con el valor de 8 para la falla de Sibundoy, que pertenece al Sistema de falla Oriental Frontal. Para la falla de Cocora se toma el valor de la falla de Ibagué, debido a que el Estudio General de Amenaza Sísmica considera la falla de Cocora como una extensión de la falla de Ibagué.

Fuente: Herrera, 2014.

Richter es la metodología que arroja las magnitudes más bajas y la relación magnitud-área de Ellsworth es la que arroja los resultados más altos en todos los casos.

Así mismo, de cada una de las analogías se puede indicar lo siguiente:

- *Analogía entre la falla Buesaco (colombiana) y la falla Camp Rock.* En este caso, la magnitud máxima obtenida para la falla de Buesaco por el método Gutenberg-Richter “original” (6,83) y la señalada en el Estudio General de Amenaza Sísmica (7,60) son mayores que la magnitud máxima encontrada para la falla Camp Rock (6,59).
- *Analogía entre la falla Cimitarra (colombiana) y la falla Dixie Valley.* La magnitud máxima calculada para la falla Dixie Valley es de 6,29, superior a la magnitud encontrada para la falla Cimitarra por medio del método Gutenberg-Richter “original” (5,66), pero inferior a la dada por el Estudio General de Amenaza Sísmica (6,90).
- *Analogía entre la falla Cocora (colombiana) y la falla Superstition Hills.* En este caso, la magnitud obtenida por la metodología Gutenberg-Richter “original” para la falla Cocora es inferior a la obtenida por la misma metodología para la falla Superstition Hills. Igualmente, el mayor valor de la magnitud máxima calculado para la falla Superstition Hills es de 6,81, similar pero inferior al propuesto por el Estudio General de Amenaza Sísmica del año 2009 para la falla Cocora.
- *Analogía entre la falla Cucuana (colombiana) y la falla Shelter Cove.* El valor obtenido de magnitud máxima para la falla Cucuana de 6,41 es muy inferior a los obtenidos para la falla Shelter Cove por los métodos

Cuadro 5

Resultados de analogía sísmológica entre fallas colombianas y fallas bien documentadas

Analogía	MAGNITUDES FALLAS COLOMBIANAS				MAGNITUDES FALLAS BIEN DOCUMENTADAS				
	GR "Original" (Herrera, 2014)	GR "Truncado" (Herrera, 2014)	EGAS 1997	EGAS 2009	GR "Original" (Herrera, 2014)	GR "Truncado" (Herrera, 2014)	GR "Truncado" (USGS)	Ellsworth (Herrera P.)	Hanks & Bakun (Herrera P.)
1	6,83	Falla Buesaco 5,19	7,60	7,60	-	-	Falla Camp Rock -	6,59	6,37
2	5,66	Falla Cimitarra NA	6,50	6,50	6,29	4,27	Falla Dixie Valley 2,56	-	-
3	5,84	Falla Cocora NA	6,50	6,90	6,32	5,71	Falla Superstition Hills 3,08	6,81	6,59
4	6,41	Falla Cucuana NA	-	-	-	-	Falla Shelter Cove -	7,37	7,29
5	6,10	Falla Garrapatas NA	6,50	6,50	-	-	Falla Mojave -	6,63	6,41
6	6,44	Falla Irlanda 5,30	-	-	6,18	5,83	Falla Imperial 3,79	6,98	6,78
7	6,44	Falla Irlanda 5,30	-	-	-	-	Falla Coyote Creek -	7,03	6,85
8	-	Falla de Oca -	7,40	6,50	-	-	Falla Shelter Cove -	7,37	7,29
9	-	Falla de Oca -	7,40	6,50	-	-	Falla North Coast -	7,51	7,48
10	-	Falla de Oca -	7,40	6,50	7,17	5,45	Owens Valley 2,32	7,26	7,15
11	5,04	Falla Potrerillos NA	-	-	6,37	4,24	Falla San Fernando 2,85	6,72	6,5
12	-	Falla Sibundoy -	8,00	8,00	-	-	Falla Emerson -	6,90	6,68
13	5,03	Falla Viani NA	-	-	-	-	Falla Parkfield -	6,09	5,87
14	5,03	Falla Viani NA	-	-	-	-	Falla Borrego Mountain -	6,81	6,59

GR= Gutenberg-Richter. EGAS=Estudio General de Amenaza Sísmica.

Fuente: Herrera, 2014.

de Ellsworth y Hanks & Bakun, que fueron 7,37 y 7,29, respectivamente.

- *Analogía entre la falla Garrapatas (colombiana) y la falla Mojave.* Las magnitudes máximas de la falla Garrapatas (6,10 y 6,50) tienen un valor similar a las magnitudes máximas calculadas para la falla Mojave, pero son inferiores a éstas, calculadas por medio de la relación de Ellsworth (6,63) y Hanks & Bakun (6,41).
- *Analogía entre la falla Irlanda y las fallas Imperial y Coyote Creek.* Entre las magnitudes obtenidas para las fallas Imperial y Coyote Creek, las más críticas en relación con las magnitudes máximas de la falla Irlanda son las magnitudes de la falla Coyote Creek (7,03 calculada por Ellsworth y 6,85 calculada por Hanks & Bakun), pues los valores son mayores que los de la falla Imperial (6,98 calculada por Ellsworth y 6,78 calculada por Hanks & Bakun) y también de la falla Irlanda (6,44 calculada por Gutenberg-Richter “Original” y 5,30 calculada por Gutenberg-Richter “Truncado”).
- *Analogía entre la falla Oca y las fallas Shelter Cove, North Coast y Owens Valley.* En este caso, la magnitud máxima dada en el Estudio General de Amenaza Sísmica en Colombia del año 1997 ( $M=7,40$ ) es muy similar a las magnitudes máximas obtenidas para las fallas Shelter Cove, North Coast y Owens Valley. Sin embargo, la magnitud de 7,51 obtenida por el método de Ellsworth es la más crítica de las magnitudes calculadas para las fallas bien documentadas.
- *Analogía entre la falla Potrerillos (colombiana) y la falla San Fernando.* La magnitud máxima para la falla colombiana es de 5,04 y fue calculada por el método Gutenberg-Richter “original”. Esta magnitud discrepa bastante del valor de la magnitud máxima calculada por la relación de Ellsworth para la falla San Fernando, que tiene un valor de 6,72.
- *Analogía entre la falla Sibundoy (colombiana) y la falla Emerson.* La magnitud máxima de la falla Emerson es 6,90, menor que la propuesta por el Estudio General de Amenaza Sísmica, que tiene un valor de 8,0.
- *Analogía entre la falla Viani (colombiana) y las fallas Parkfield y Borrego Mountain.* La magnitud máxima calculada para la falla Borrego Mountain por medio de la relación de Ellsworth (6,81) es mayor que las magnitudes máximas calculadas de la falla Parkfield (6,09 calculada por Ellsworth) y la falla Viani (5,03 calculada por Gutenberg-Richter “Original”).

De acuerdo con los resultados obtenidos de la analogía, se recomienda que para las fallas colombianas estudiadas se utilicen los valores más altos de las magnitudes máximas (cuadro 6). Es importante tener en cuenta que no se han asociado sismos de las magnitudes descritas a fallas colombianas, por lo que se corre el riesgo de sobre estimar la magnitud máxima de cada falla.

**Cuadro 6**  
Magnitudes máximas recomendadas para fallas colombianas estudiadas

Falla colombiana	M	Fuente
Buesaco	7,60	Estudio General de Amenaza Sísmica 2009
Cimitarra	6,50	Estudio General de Amenaza Sísmica 2009
Cocora	6,90	Estudio General de Amenaza Sísmica 2009
Cucuana	7,37	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla Shelter Cove)
Garrapatas	6,63	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla Mojave)
Irlanda	7,03	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla Coyote Creek)
Oca	7,51	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla North Coast)
Potrerillos	6,72	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla San Fernando)
Sibundoy	8,00	Estudio General de Amenaza Sísmica 2009
Viani	6,81	Resultado de la analogía (relación Ellsworth (Herrera) para la falla Borrego Mountain)

M= magnitud máxima recomendada.  
Fuente: Herrera, 2014.



## REFERENCIAS

- Alfaro, A. (2012). Difficulties on PSHA in Colombia Because of Data Scarcity. *Bulletin of IISEE*, N.º 46, pp. 145-152.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1996). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Bogotá, 252 pp.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2009). Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Bogotá, 220 pp.
- Burford, R. (1972). Continued Slip on the Coyote Creek Fault after the Borrego Mountain Earthquake. *Geological Survey Professional Paper*, 787, pp. 105-111.
- Ellsworth, W. (2003). Earthquake Probabilities in the San Francisco Bay Region: 2002–2031. Chapter 4 -The SFBR Earthquake Source Model: Magnitude and Long Term Rates and Appendix D of the 2002 Working Group on California Earthquake Probabilities. Open-File Report 03-214.
- Gutenberg, B. & Richter, C. (1942). Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 32, 163-191.
- Gutenberg, B. & Richter, C. (1956). Magnitude and Energy of Earthquake. *Ann. Geofis*, 1-15.
- Hamilton, R. (1972). Aftershocks of Borrego Mountain Earthquake from April 12 to June 12, 1968. *Geological Survey Professional Paper*, 787, pp. 31-54.
- Hanks, T. C. & Bakun, W.H. (2002). A bilinear source-scaling model for M-log A observations of continental earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer*, vol. 92, 1841-1846.
- Hanks, T. C. & Bakun, W.H. (2008). M-log A observations for recent large earthquakes, doi: 10.1785/0120070174. *Bulletin of the Seismological Society of America*, February, vol. 98, N.º 1, 490-494.
- Herrera, P. (2014). Caracterización sísmica de fallas colombianas por analogía con fallas conocidas geológica y sismológicamente. Tesis de maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, pp. 18-138.
- Langbein, J. (2006). Coseismic and Initial Postseismic Deformation from the 2004 Parkfield, California, Earthquake. Observed by Global Positioning System, Electronic Distance Meter, Creepmeters, and Borehole Strainmeters Era. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 96, N.º 4B, pp. 304-320.
- Montes, N. & Sandoval, A. (2001). Base de datos de fallas activas de Colombia. Bogotá: Ingeominas, pp. 9-28.
- National Geophysical Data Center (2013). <<http://ngdc.noaa.gov/>>
- Page, W.D. (1986). Geología Sísmica y Sismicidad del Noroeste de Colombia. Seismic geology and seismicity of Northwestern Colombia: San Francisco, California, Woodward-Clyde Consultants Report for ISA and Integral Ltda, 200 p
- París, G. & Romero, J. (1993). Fallas activas de Colombia. *Boletín Geológico*, N.º 34. Bogotá: Ingeominas, pp. 25.
- París, G., Machette, M., Dart, R. & Haller, K. (2000). Map and Database of Quaternary Faults and Folds in Colombia and its Offshore Regions. USGS.
- Ramírez, J. E. (1975). *Historia de los terremotos en Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (2009). *Atlas de Deformaciones Cuaternarias de los Andes*. Publicación geológica multinacional, pp. 244-250.
- Sharp, R. (1972). Tectonic Setting of the Salton Trough. *Geological Survey Professional Paper*, 787, pp. 3-15.
- Stirling, M., Rhoades, D. & Berryman, K. (2002). Comparison of Earthquake Scaling Relations Derived from Data of the Instrumental and Preinstrumental Era. *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 92, N.º 2, pp. 812-830.
- USGS (2013). Global Earthquake Search. <[www.earthquake.usgs.gov](http://www.earthquake.usgs.gov/)>.
- Wells, L. & Coppersmith, K. (1994). New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 84, N.º 4, pp 974-1002.
- Yeats, R.S., Sieh, K. & Allen, C.R. (1997). *Geology of earthquakes*, Oxford University Press, 568 pp.

# Energía de fractura en modo I del concreto de resistencia normal reforzado con fibras cortas de acero

## Mode I Fracture Energy of regular resistance concrete reinforced with short steel fibers

SERGIO MAURICIO SEGURA ARENAS<sup>1</sup> - FABIÁN AUGUSTO LAMUS BÁEZ<sup>2</sup>

1. Ingeniero civil y magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil, magíster en Estructuras, profesor asistente, Universidad de La Salle.

sergio.segura@mail.escuelaing.edu.co - falamus@unisalle.edu.co

Recibido: 27/03/2014 Aceptado: 15/06/2014

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

### Resumen

La energía de fractura (Griffith, 1924) es un parámetro relevante para las simulaciones numéricas de miembros estructurales de concreto fibrorreforzado y se ve influenciada por sus materiales constitutivos. En este trabajo se determinó experimentalmente el valor de la energía de fractura para concreto reforzado con fibras cortas de acero (SFRC, por su sigla en inglés), a partir de mezclas de concreto de resistencia normal en Colombia. Se prepararon probetas para tres tipos de mezclas de concreto con relaciones agua/cemento: 0,58, 0,50 y 0,40, sin refuerzo y reforzadas con tres cuantías volumétricas de fibra de acero: 0,5, 1,0 y 2,0 %. Se estudió la respuesta estructural de las probetas solicitadas a compresión, flexión y tracción indirecta a través de ensayos independientes para cada fenómeno. La energía específica de fractura en modo I (Irwin, 1962) se estimó a partir del modelo de fisura cohesiva (Barenblatt, 1962; Hillerborg, 1978), empleando el método de trabajo de fractura (Hillerborg, 1978) calculado para los datos experimentales.

**Palabras claves:** energía de fractura, SFRC, mecánica de fractura, fisura cohesiva.

### Abstract

Fracture Energy (Griffith, 1924) is a relevant parameter for numerical simulations of fiber reinforced concrete structural members, and is influenced by its constituent materials. In this paper we experimentally determined the value of the fracture energy for steel-fiber reinforced concrete (SFRC), from concrete mixtures of normal strength in Colombia. Specimens were prepared for three (3) types of concrete mixes with water / cement ratios: 0.58, 0.50 and 0.40, plain concrete and reinforced with (3) volumetric amounts of steel fiber: 0.5, 1.0 and 2.0%. We studied the structural response of the specimens requested compression, bending and splitting tensile through independent tests for each phenomenon. The specific Fracture Energy in Mode I (Irwin, 1962) was estimated from the cohesive crack model (Barenblatt, 1962; Hillerborg, 1978) using the method of work of fracture (Hillerborg, 1978) calculated for the experimental data.

**Keywords:** fracture energy, SFRC, fracture mechanics, cohesive crack..

## INTRODUCCIÓN

La adición de fibras cortas de acero al concreto es una técnica que se viene empleando desde hace varias décadas y que da origen a un material compuesto denominado precisamente concreto reforzado con fibras cortas de acero (SFRC, por su sigla en inglés). La presencia de fibras de acero en la matriz de concreto afecta las propiedades de la mezcla fresca, por lo cual se deben cumplir requisitos específicos para su preparación (ACI, 2008). En estado endurecido, las mezclas adicionadas con fibras de acero conllevan una mejora en su desempeño, observada como disminución de la fisuración por retracción, aumento en la resistencia a tensión e incremento en la ductilidad del concreto. El incremento en la energía específica de fractura ( $G_F$ ), en concretos reforzados con fibra respecto al concreto simple, es más notable que el aumento observado en el resto de las propiedades mecánicas (Chuanbo, 2006).

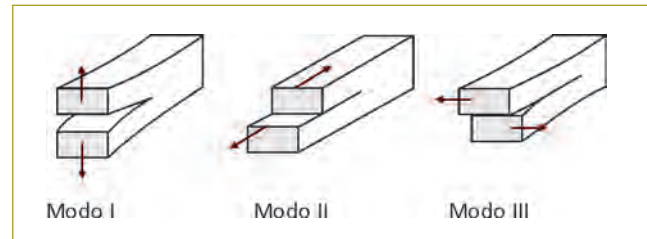
En este trabajo se calcula la energía específica de fractura ( $G_F$ ) en el modo I a través del modelo de fisura cohesiva (MFC), a partir de los resultados experimentales para una serie de especímenes solicitados a ensayos de flexión y tracción indirecta realizados por Segura (Segura, 2013). Adicionalmente, se hizo la comparación de la energía de fractura entre series de especímenes, considerando la variación de la relación agua/cemento y la cuantía volumétrica de fibra.

Se usó un tipo de fibra metálica de alta resistencia, provista de ganchos de anclaje en sus extremos, con el fin de incrementar la transferencia de cargas entre las caras de las fisuras, aumentando la resistencia del concreto a la tracción y en general produciendo una mejora en el desempeño de la matriz de concreto.

## MODELO DE FISURA COHESIVA

Dentro de la mecánica de la fractura se consideran tres tipos de materiales idealizados: los frágiles, los dúctiles y los cuasifrágiles. El concreto, junto con algunas rocas y algunos materiales cerámicos, muestra un comportamiento cuasifrágil. Griffith determinó que no era conveniente representar la fractura mediante una expresión en términos de esfuerzos, dado que éstos tienden al infinito en la punta de la fisura (Griffith, 1924); con ello surgió el criterio de energía como base para los análisis de fractura.

En general, la fractura se puede presentar en uno de los tres modos que se presentan a continuación o como una combinación de éstos (figura 1). El modo I o modo de apertura es el objeto de estudio del presente trabajo.



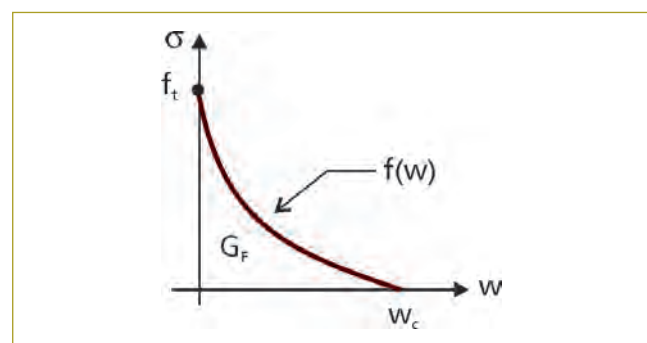
Tomada de Arana y González, 2002.

**Figura 1.** Modos básicos de fractura.

En el modelo de fisura cohesiva (MFC) (Barenblatt, 1962), como principio fundamental se asume que, aun cuando la fisura se extiende y se abre, se sigue presentando una transferencia de esfuerzos de tracción entre las caras de ésta. La energía específica de fractura ( $G_F$ ) es la cantidad de energía necesaria para crear una unidad de superficie completamente fisurada y corresponde al área bajo la curva de la función de ablandamiento (ecuación 1).

$$GF = \int_0^{w_c} f(w)dw \quad (1)$$

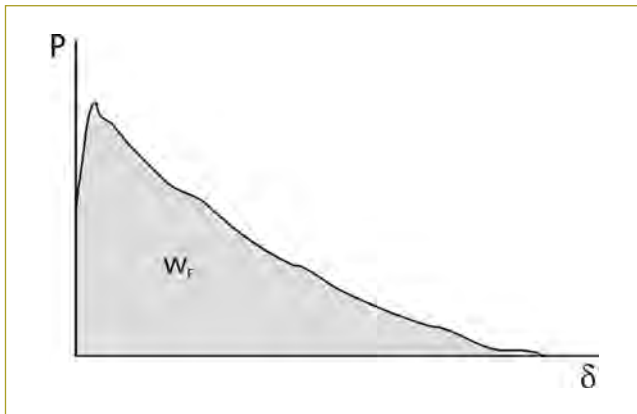
A continuación se presenta esquemáticamente una función de ablandamiento, donde  $w$  es la apertura de la fisura,  $w_c$  la apertura crítica de la fisura a la cual se pierde completamente la capacidad de transmitir esfuerzos y  $\sigma$  el esfuerzo de tracción en el material.



Tomada de Bažant y Planas, 1998.

**Figura 2.** Función de ablandamiento del concreto.

Debido a que existen dificultades prácticas para determinar directamente la curva de ablandamiento a través de ensayos de tracción, es más frecuente el desarrollo de ensayos indirectos como el de flexión con carga central (Rilem, 2002) y el de tracción indirecta (Icontec, 2000).



**Figura 3.** Trabajo de fractura en el modelo de grieta cohesiva.

El método general para determinar  $G_F$  experimentalmente mediante el MFC es el de trabajo de fractura o de trabajo total (Hillerborg, 1978). Consiste en determinar el trabajo de fractura de acuerdo con la ecuación 2, a partir de la curva carga contra desplazamiento (figura 3), y dividirlo por el área que liga o une las dos caras de la fisura usando la ecuación 3.

$$W_F = \int_0^{\delta} P \, d\delta \quad (2)$$

$$G_F = \frac{W_F}{A_{lig}} \quad (3)$$

## MATERIALES

Se prepararon mezclas de concreto simple con tres relaciones agua/cemento: 0,40, 0,50 y 0,58, a las cuales se les realizaron adiciones de fibra de acero en cuantías volumétricas de 0,5 % (40 kg/m<sup>3</sup>), 1,0 % (80 kg/m<sup>3</sup>) y 2,0 % (160 kg/m<sup>3</sup>), para un total de doce dosificaciones, incluyendo las de los concretos sin adición de fibras. Debido a que la inclusión de las fibras de acero disminuye sensiblemente la manejabilidad de la mezcla se requirió el uso de un superplastificante no reductor de agua que cumpliera con la clasificación ASTM C1017 (ASTM, 2007), tipos I y II. Para la dosificación de las mezclas se aplicaron las recomendaciones de Nataraja (Nataraja et al., 2005).

La fibra metálica empleada como refuerzo corresponde al tipo I, de acuerdo con la clasificación del estándar ASTM A820-11 (ASTM, 2011) y NTC 5214 (Icontec, 2003), con una relación de aspecto de 80, generalmente utilizada para la reducción de juntas en pisos industriales o con altas solicitaciones estructurales. Las características de la fibra de acero se presentan a continuación (cuadro 1).

## CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Se elaboraron dos juegos de probetas; para el ensayo de flexión se usaron viguetas de sección 150 x 150 mm

**Cuadro 1**

Ficha técnica de la fibra de acero empleada

Diámetro (d)	0,75 mm ± 0,03 mm	
Longitud (L)	60 mm ± 0,03	
Relación de aspecto (L/d)	80	
Sección transversal	circular	
Referencia comercial	CHO 80/60	
Clasificación NTC 5214	I	
Resistencia mínima tensión	1100 MPa	
Acero	crudo, brillante, con bajo contenido de carbono	
Presentación	Pegada	

Fuente: Imocom Colombia.



**Cuadro 2**  
Tipos de ensayos realizados

Ensayo	Dimensiones	Parámetro mecánico	Parámetro en fractura
Compresión simple NTC 673 (Icontec, 2010)	cilindro d:100 mm x h:200 mm	$f'_c$ Resistencia a la compresión 28 días	
Flexión Rilem TC162 (Rilem, 2002)	vigueta 150 mm x 150 mm x 500 mm	$f_R$ Módulo de rotura, resistencia a la flexión	$G_{FI}$
Tracción indirecta NTC 722 (Icontec, 2004)	cilindro d:100 mm x h:200 mm	$f_t$ Resistencia a la tracción indirecta	$G_{FI}$

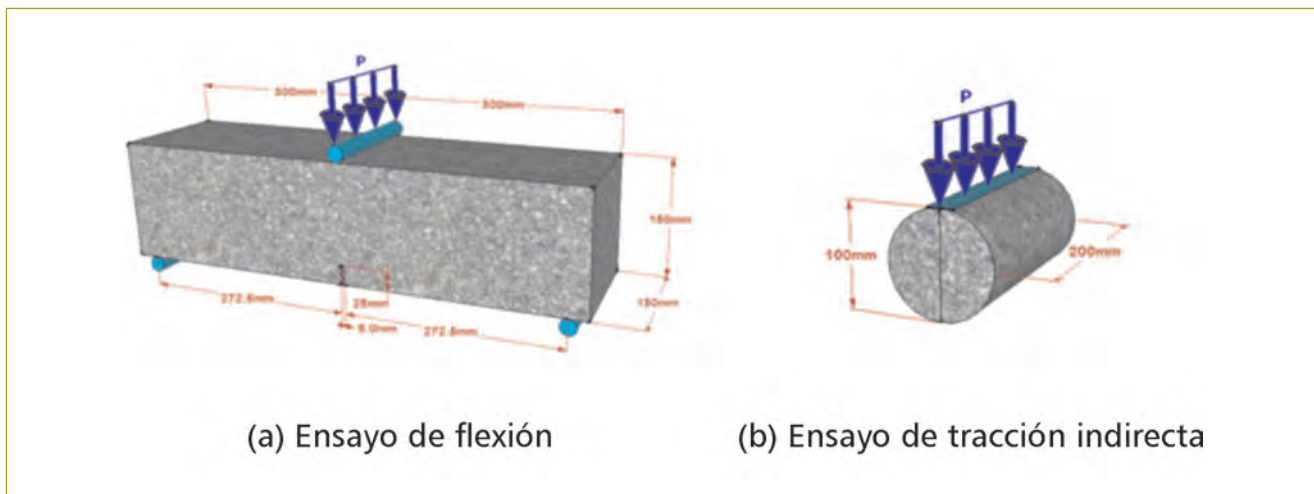
y longitud 600 mm, a las cuales se les realizó una entalla, con una profundidad de 25 mm, en el centro de la luz. Para el ensayo de tracción indirecta se prepararon cilindros de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura.

Adicionalmente, se hicieron ensayos a compresión para caracterizar las mezclas de concreto simple sobre el mismo tipo de cilindros usados para tracción indirecta. Los especímenes se fallaron a una edad mínima de 28 días. Más adelante se presenta un resumen de los ensayos realizados, el estándar utilizado para su ejecución, y los parámetros obtenidos a partir de éstos (cuadro 3).

En total se produjeron 84 probetas para caracterizar la fractura en modo I, (cuadro 3); la codificación de probetas A, B y C indica la relación a/c 0,50, 0,58 y 0,40, respectivamente, en tanto que los dígitos subsecuentes representan la cuantía volumétrica de fibra.

**Cuadro 3**  
Resumen de las probetas fabricadas

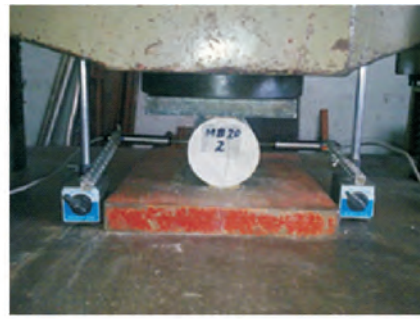
Mezcla	$\rho_f$ %	Cilindros compresión	Cilindros Tracción indirecta	Viguetas flexión con carga central
M.A00	0,0	4	4	3
M.A05	0,5		4	3
M.A10	1,0		4	3
M.A20	2,0		4	3
M.B00	0,0	4	4	3
M.B05	0,5		4	3
M.B10	1,0		4	3
M.B20	2,0		4	3
M.C00	0,0	4	4	3
M.C05	0,5		4	3
M.C10	1,0		4	3
M.C20	2,0		4	3
		12	48	36



**Figura 4.** Probetas utilizadas para fractura en modo I.



(a) Flexión con carga central



(b) Tracción indirecta

Figura 5. Instrumentación y ejecución de los ensayos.

La preparación de probetas incluyó corrección por humedad de campo de los agregados, verificación y corrección del asentamiento, cuando se requirió, por medio del plastificante (no mayor de 0,5 % del peso del cementante), vertido y vibrado en moldes, preparación de testigos sin fibra mediante extracción manual, desencofrado y curado por inmersión, y elaboración de las entallas en las viguetas mediante sierra húmeda un día antes del ensayo. En la página anterior se presentan la geometría y el esquema del montaje de las probetas utilizadas (figura 4).

Los ensayos se realizaron con la máquina universal de ensayos Shimatzu UT-100 A, con celda de carga de 50 ton. La carga aplicada se registró en módulo Winsoft a intervalos de dos segundos, mientras que la respuesta local se midió mediante deformímetros digitales LVDT de 1" de carrera y se registró en el módulo LabView a intervalos de 0,2 seg. En la rama ascendente la tasa de aplicación de la carga utilizada fue de 0,5 mm/min y se mantuvo en descarga hasta un 80 % de la carga máxima, y a partir de este punto se incrementó a 1mm/min. Se presentan el montaje y la instrumentación implementada para cada uno de los ensayos (figura 5).

**RESULTADOS**

Seguidamente se pueden apreciar los valores promedios de la resistencia a la compresión  $f'_c$ , obtenidos a los 28 días, conforme a lo establecido en NTC 673 (Icontec, 2010). Los valores entre paréntesis representan la dispersión de la muestra (cuadro 4).

**Cuadro 4**  
Resistencia a la compresión

Mezcla	a/c	$f'_c$ prom MPa
B00	0,58	25,4 ( ± 2,4)
A00	0,50	27,5 ( ± 2,6)
C00	0,40	41,2 ( ± 4,7)

**Energía de fractura en flexión**

La resistencia a la flexión se calculó como el módulo de rotura  $f_R$  a partir de la carga máxima, de acuerdo con ASTM C293 (ASTM, 2010) usando la ecuación 4.

$$f_R = \frac{3}{2} * \frac{Pu * S}{B(D - a_0)^2} \tag{4}$$

Donde  $Pu$  es la carga máxima alcanzada,  $S$  luz libre entre apoyos,  $B$  ancho de la sección,  $D$  altura o canto y  $a_0$  profundidad de la entalla.

A partir de las áreas bajo las curvas de respuesta carga - deflexión en el centro de la luz, se procedió al cálculo del trabajo de fractura  $WF$  hasta  $\delta$ : 5 mm de acuerdo con la ecuación 5 mediante la metodología descrita en el TC50-FMC (Rilem, 1985) y la corrección por peso propio (Bažant & Planas, 1998; Elices et al., 1992).

$$WF = \frac{(m1 + m2) \cdot g \cdot \delta_B}{2} + WF_0 \tag{5}$$

Donde  $m1$  es la masa de la probeta,  $m2$  es el peso del montaje apoyado sobre la vigueta,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\delta_b$  la deflexión adoptada 5 mm, y  $WF_0$  es área bajo la curva  $P-\delta$  hasta  $\delta_b$ .

Para calcular la energía específica de fractura ( $G_{FI}$ ) se dividió el trabajo de fractura en el área de liga de la fisura usando la ecuación 6.

$$G_{FI} = \frac{WF}{Alig} = \frac{WF}{B(D - a_0)} \quad (6)$$

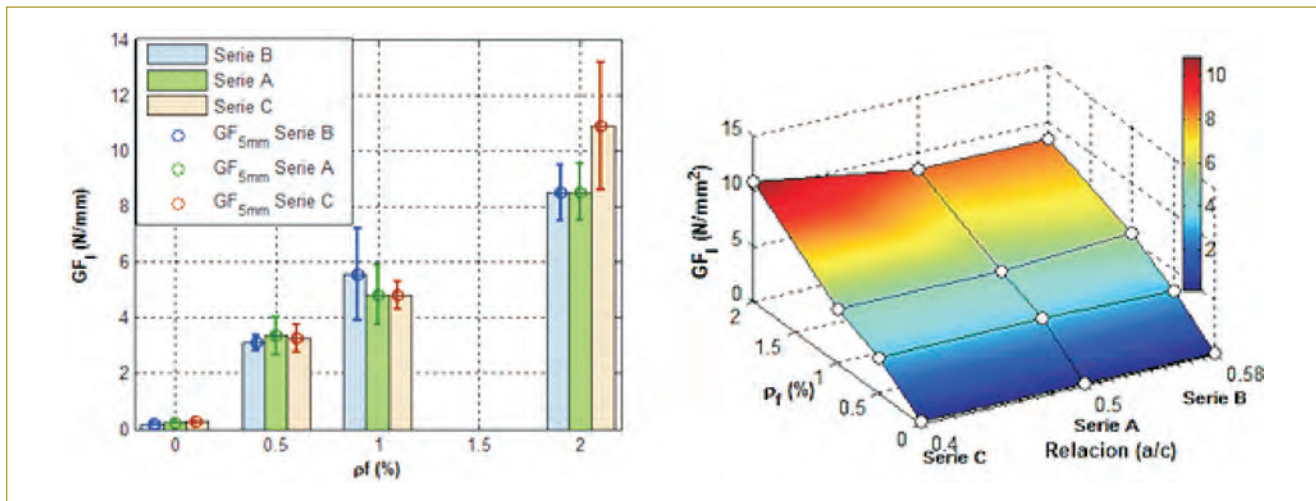
Donde  $G_{FI}$  es energía de fractura modo I,  $WF$  el trabajo de fractura y  $Alig$ , el área que liga las dos caras de la fisura.

A continuación se resumen los resultados promedio obtenidos para el módulo de rotura y la energía de fractura en flexión, calculados para los doce tipos de mezclas (cuadro 5).

Los resultados sugieren que la energía de fractura se incrementa considerablemente con el aumento de la cuantía volumétrica de fibras de acero adicionadas, independientemente de la calidad de la matriz de concreto. Más adelante se presentan el comportamiento de la relación entre la energía de fractura en flexión para el SFRC y el concreto simple, en función de la cuantía volumétrica de fibras (figura 6).

**Cuadro 5**  
Evaluación de resistencia y energía de fractura en flexión

Relación a/c	Mezcla	Vf (%)	$f_R$ MPa	$fR/fR_0$	$G_{FI}$ N/mm	$G_{FI}/G_{FI,0}$
0,580	B	0,0	3,2 ( $\pm 0,19$ )	1,0	0,165 ( $\pm 0,006$ )	1,0
		0,5	4,16 ( $\pm 0,49$ )	1,3	3,091 ( $\pm 0,259$ )	18,7
		1,0	8,25 ( $\pm 1,9$ )	2,6	5,558 ( $\pm 1,637$ )	33,7
		2,0	12,02 ( $\pm 1,42$ )	3,8	8,503 ( $\pm 1,004$ )	51,5
0,500	A	0,0	3,77 ( $\pm 0,1$ )	1,0	0,218 ( $\pm 0,003$ )	1,0
		0,5	4,61 ( $\pm 1,09$ )	1,2	3,343 ( $\pm 0,657$ )	15,3
		1,0	7,82 ( $\pm 1,39$ )	2,1	4,829 ( $\pm 1,086$ )	22,2
		2,0	13,93 ( $\pm 1,05$ )	3,7	8,508 ( $\pm 1,015$ )	39,0
0,400	C	0,0	4,73 ( $\pm 0,01$ )	1,0	0,253 ( $\pm 0,03$ )	1,0
		0,5	4,79 ( $\pm 0,53$ )	1,0	3,264 ( $\pm 0,522$ )	12,9
		1,0	7,68 ( $\pm 0,6$ )	1,6	4,829 ( $\pm 0,495$ )	19,1
		2,0	15,96 ( $\pm 3,09$ )	3,4	10,885 ( $\pm 2,303$ )	43,0



**Figura 6.** Energía de fractura calculada a partir del ensayo a flexión.

**Energía de fractura en tracción indirecta**

La resistencia a la tracción indirecta ( $f_{ts}$ ) se calculó conforme a lo especificado en la norma NTC 722 (Icontec, 2000) usando la ecuación 7.

$$f_{ts} = \frac{2Pu}{\pi DL} \tag{7}$$

Donde  $Pu$  es la carga máxima alcanzada,  $D$  el diámetro de la probeta y  $L$  el largo de la probeta.

La energía específica de fractura en modo  $G_{FI}$  se evaluó hasta una extensión diametral, perpendicular a la aplicación de la carga igual a 5 mm, de acuerdo con la ecuación 8.

$$G_{FI} = \frac{W_F}{Alig} = \frac{W_F}{L \cdot D} \tag{8}$$

Donde  $WF$  es el trabajo de fractura calculado como el área bajo la curva  $P-\delta$  hasta una deflexión de 5 mm,  $Alig$  el área que liga las dos caras de la fisura,  $L$  la longitud de la probeta y  $D$  el diámetro de ésta.

Más adelante se resumen los resultados promedio obtenidos para la resistencia a la tracción indirecta y la energía de fractura en tracción, calculados para los doce tipos de mezclas (cuadro 6).

Por lo general se acepta que  $f_{ts}$  representa aproximadamente la resistencia a la tensión del concreto. Se

comprobó que en términos generales la inclusión de fibra metálica incrementa la resistencia a la tensión del concreto. Sin embargo, en las probetas  $B$ , las de mayor relación  $a/c$ , se observó un ligero decrecimiento de resistencia en la mezcla con mayor cuantía de fibra. La ganancia de resistencia a la tensión en las mezclas con  $V_f = 2,0\%$  es aproximadamente el doble, comparado con las muestras de concreto simple.

En la página siguiente se puede apreciar el comportamiento de la relación entre la energía de fractura en tracción para el SFRC y el concreto simple, en función de la cuantía volumétrica de fibras (figura 7).

Durante el ensayo se observó que el modo de fractura exhibido por los especímenes no fue exclusivamente de apertura en tracción, lo que sugiere que el ensayo puede no ser el adecuado para medir  $G_{FI}$ ; se sugiere ampliar la investigación con ensayos de tensión directa uniaxial.

**Comparación entre ensayos**

Más adelante se registra la comparación entre los resultados de los ensayos de flexión y tracción indirecta. Aparecen entre paréntesis los valores de desviación estándar de la muestra, en tanto que el valor de comparación  $G_{FI,t}$  y  $G_{FI,b}$  representa la relación entre  $G_{FI}$  a tracción indirecta y a flexión.

**Cuadro 6**  
Evaluación de resistencia y energía de fractura en tracción indirecta

Relación a/c	Mezcla	Vf (%)	$f_{ts}$ MPa	$f_{ts}/f_{ts0}$	$G_{FI}$ N/mm	$G_{FI}/G_{FI-0}$
0,580	B	0,0	1,87 (± 0,05)	1,0	2,844 (±1,598)	1,0
		0,5	2,76 (± 0,28)	1,5	16,138 (±4,73)	5,7
		1,0	5,00 (± 0,77)	2,7	33,23 (±4,393)	11,7
		2,0	4,61 (± 0,48)	2,5	33,476 (±3,841)	11,8
0,500	A	0,0	3,34 (± 0,15)	1,0	0,973 (±0,234)	1,0
		0,5	5,03 (± 0,36)	1,5	27,541 (±2,857)	28,3
		1,0	5,26 (± 0,30)	1,6	34,281 (±2,444)	35,2
		2,0	8,04 (± 0,79)	2,4	50,919 (±7,12)	52,3
0,400	C	0,0	3,55 (± 0,31)	1,0	0,394 (±0,101)	1,0
		0,5	5,34 (± 0,31)	1,5	29,61 (±0,939)	75,2
		1,0	6,23 (± 0,44)	1,8	37,323 (±6,446)	94,7
		2,0	6,29 (± 0,58)	1,8	36,489 (±3,857)	92,6



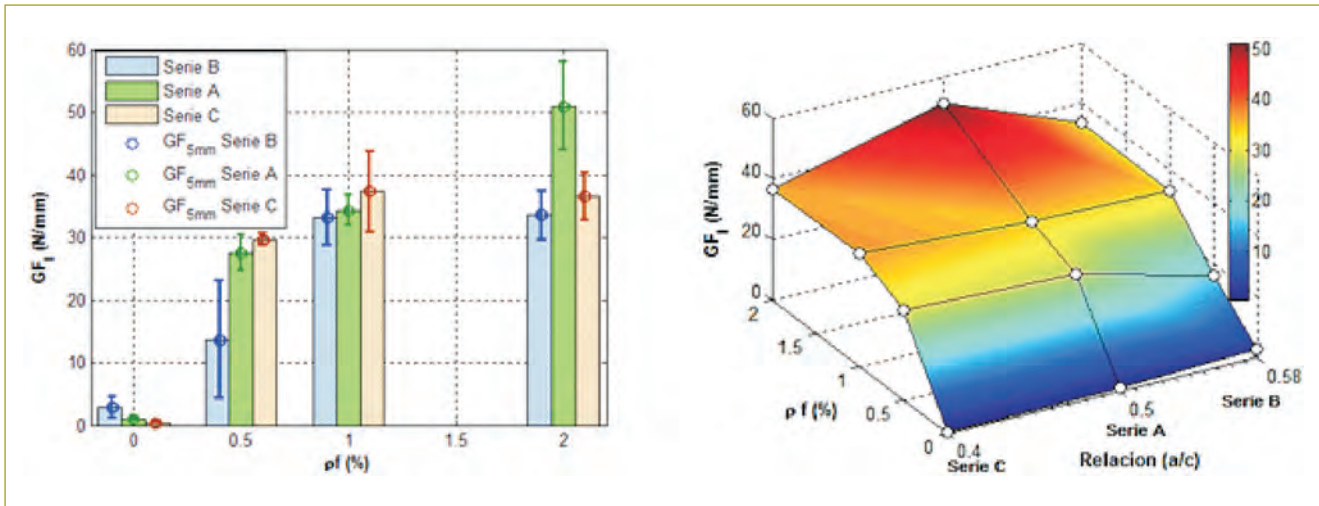


Figura 7. Resistencia a la tracción indirecta y energía de fractura.

**Cuadro 7**  
Comparación entre los modos de fractura I - flexión y tracción indirecta

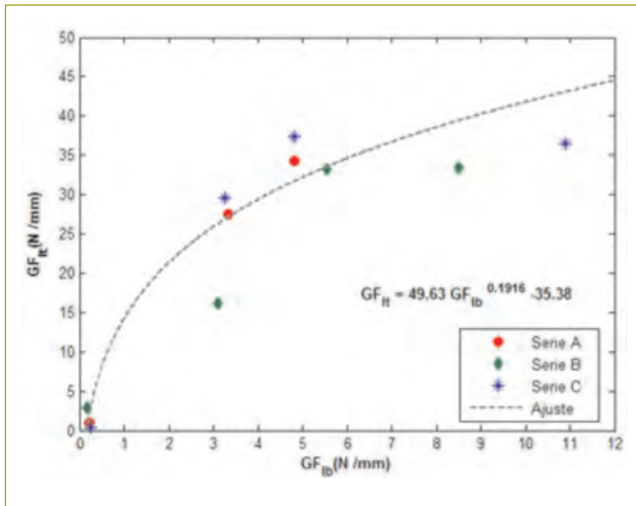
Serie	a/c	ρf %	Flexión		Tracción		GF <sub>I</sub> t / GF <sub>I</sub> b
			GF <sub>I5mm</sub> N/mm	GF <sub>I</sub> /GF <sub>I0</sub>	GF <sub>I5mm</sub> N/mm	GF <sub>I</sub> /GF <sub>I0</sub>	
B00	0,58	0,0	0,165 (±0,006)	1,0	2,844 (±1,598)	1,0	17,2
B05		0,5	3,091 (±0,259)	18,7	16,138 (±4,73)	5,7	5,2
B10		1,0	5,558 (±1,637)	33,7	33,23 (±4,393)	11,7	6,0
B20		2,0	8,503 (±1,004)	51,5	33,476 (±3,841)	11,8	3,9
A00	0,50	0,0	0,218 (±0,003)	1,0	0,973 (±0,234)	1,0	4,5
A05		0,5	3,343 (±0,657)	15,3	27,541 (±2,857)	28,3	8,2
A10		1,0	4,829 (±1,086)	22,2	34,281 (±2,444)	35,2	7,1
A20		2,0	8,508 (±1,015)	39,0	50,919 (±7,12)	52,3	6,0
C00	0,40	0,0	0,253 (±0,03)	1,0	0,394 (±0,101)	1,0	1,6
C05		0,5	3,264 (±0,522)	12,9	29,61 (±0,939)	75,2	9,1
C10		1,0	4,829 (±0,495)	19,1	37,323 (±6,446)	94,7	7,7
C20		2,0	10,885 (±2,303)	43,0	36,489 (±3,857)	92,6	3,4

Exceptuando el valor obtenido para la serie B00, la relación obtenida está entre 1,6 y 9,1 veces. De la comparación se infiere que aunque se trata del mismo modo de fractura en apertura, el tipo I, en los ensayos a tracción indirecta se presentan fenómenos de aplastamiento, los cuales sobrestiman el valor de energía. En este punto vale recordar que el ensayo normalizado más ampliamente aceptado para la determinación de la energía de fractura es el de flexión bajo carga central, o de viga tres apoyos (Rilem, 2002) . Más adelante se hace la comparación entre la energía de fractura a flexión y

a tracción indirecta. Se obtiene y presenta una función entre los valores promedio obtenidos, con un coeficiente de correlación R<sup>2</sup> de 0,8739 (figura 8).

**CONCLUSIONES**

El trabajo realizado contribuye a la discusión sobre el uso de fibra metálica como refuerzo para mejorar el desempeño de la matriz de concreto, a través de la determinación del parámetro de fractura G<sub>I</sub>. Algunas de las conclusiones específicas del trabajo son:



**Figura 8.** Comparación entre energía de fractura modo I a flexión y a tracción indirecta.

1.  $G_F$  modo I se incrementa con la adición de fibras, para cada una de las tres mezclas analizadas individualmente y en cada uno de los fenómenos estudiados. El incremento de  $G_{FI}$  en el concreto reforzado con fibras con respecto al concreto simple es mucho mayor que el incremento en las resistencias  $f_{ts}$  y  $f_R$ . Los valores de incremento con respecto al concreto simple se calcularon entre 12 y 51 veces para los ensayos de flexión y 5 y 95 veces para los ensayos de tracción.
2. En los ensayos de tracción indirecta puede afirmarse que el ensayo no correspondió a un modo puro de tensión. Se observó en los ensayos que después de alcanzada la curva pico y durante el tramo descendente de la curva de ablandamiento empezaban a presentarse comportamientos de aplastamiento en la probeta, momento en el cual era más apropiado suspender el ensayo. El parámetro de fractura  $G_{FI}$  medido con el ensayo de tracción, no es adecuado; se sugiere ampliar la investigación de  $G_{FI}$  con ensayos de tensión directa uniaxial (Rilem, 2001). La resistencia máxima  $f_{ts}$ , en cambio, se obtuvo con éxito y es esencial para la caracterización de la curva de ablandamiento del concreto en el MFC.
3. Se registraron incrementos de 1,5 a 2,7 veces la resistencia a la tensión  $f_{ts}$  y de 1,2 a 3,8 veces la resistencia a la flexión, con respecto a las muestras de concreto simple, evidenciando la mejora en desempeño de la mezcla con fibra.

## NOMENCLATURA

- $a_0$  Longitud de la grieta inicial, longitud de la muesca o ranura.
- A Factor de ajuste de cola lejana.
- Alig Área de liga de las dos caras de la grieta, sección efectiva de vigueta.
- B Ancho de la viga.
- $\delta$  Deflexión o flecha.
- $\phi$  Diámetro del espécimen.
- D Altura o canto de la vigueta.
- De Altura efectiva de la vigueta.
- $f'_c$  Resistencia a la compresión del concreto a una edad de 28 días.
- $f_{ts}$  Resistencia a la tensión del concreto.
- $f_R$  Módulo de rotura, resistencia a la flexión del concreto.
- g Aceleración de la gravedad.
- $G_F$  Energía específica de fractura [N/mm].
- $G_{FI-0}$  Energía específica de fractura de las probetas de concreto simple [N/mm].
- $G_F^c$  Energía específica de fractura en compresión.
- $G_{FI}$  Energía específica de fractura para grieta modo I.
- MFC Modelo de fisura cohesiva.
- S Luz libre entre los apoyos.
- Pu Carga máxima alcanzada.
- SFRC Concreto reforzado con fibras cortas de acero.
- w Apertura en la boca de la grieta.
- wc Apertura crítica en la boca de la grieta.
- WF Trabajo total de fractura.
- WF0 Trabajo inicial de fractura medido como el área bajo la curva P- $\delta$ .

## REFERENCIAS

- American Concrete Institute (2008). *Guide for specifying, proportioning, and production of fiber-reinforced concrete*. Farmington Hills, Michigan: ACI, 16 pp. ACI 544-3R 08.
- Arana, J.L. & González, J.J. (2002). *Mecánica de fractura*. Bilbao (España): Universidad del País Vasco. Servicio Editorial. ISBN 8483 7345 59 9788 4837 34551.
- American Standard Trade Marks (2007). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete*. USA: ASTM, 9 pp. ASTM C1017 / C1017M - 07.
- American Standard Trade Marks (2010). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. USA: ASTM, 3 pp. ASTM C293 / C293M - 10.
- American Standard Trade Marks (2011). *Standard Specification for Steel Fibers for Fiber Reinforced Concrete* USA: ASTM, 4 pp. ASTM A820 /A820M - 11.

- Barenblatt, G.I. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. En *Advance Applied Mechanics*, vol. 7, N.º 1, pp. 55-129
- Bazant, Z. & Planas, J. (1998). *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. Boca Raton, Florida: CRC Press. ISBN 0-8493-8284-X.
- Chuanbo, W. (2006). *Experimental Investigation on Behavoir of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC)*. Thesis of Master. New Zeland: Department of Civil Engineering. University of Canterbury, 165 pp.
- Elices, M., Guinea, G. & Planas, J. (1992). On the Measurement of Concrete Fracture Energy Using Three-point Bend Tests. Part 1 - Influence of experimental procedures. En *Materials and Structures*, vol. 25, N.º 200, pp. 212-218.
- Griffith, A.A. (1924). The theory of rupture. En *Proceedings of the First International Conference of Applied Mechanics*, pp. 55-63.
- Hillerborg, A. (1978). *A model for fracture analysis*. Lund, Sweden: Lund Institute of Technology, Division of Building materials.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2000). *Concretos. Método de ensayo para determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto*. Tercera actualización. Bogotá, D.C.: Icontec, 12 pp. NTC 722.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2003). *Fibras de acero para Refuerzo de concreto*. Primera actualización. Bogotá, D.C.: Icontec, 8 pp. NTC 5214.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2000). *Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios)*. Segunda actualización. Bogotá, D.C.: Icontec, 9 pp. NTC 2871.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2010). *Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Tercera actualización. Bogotá, D.C.: Icontec, 13 pp. NTC 673.
- Irwin, G.R. (1962). Crack-Extension Force for a Part-Through Crack in a Plate. En *Journal of Applied Mechanics*. January, vol. 29, N.º 4, p. 651
- Nataraja, M.C., Nagaraj, T.S. & Basavaraja, S.B. (2005). Reportioning of steel fibre reinforced concrete mixes and their impact resistance. En *Cement and Concrete Research*, vol. 35, N.º 12, pp. 2350-2359.
- Rilem (1985). Draft Recommendation (TC50-FMC) Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend test on notched beams. En *Materials and structures*, vol. 18, N.º 4, pp. 287-290.
- Rilem (2001). Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Uniaxial tension test for steel fibre reinforced concrete. En *Materials and Structures*, vol. 34, pp. 3-6.
- Rilem (2002). TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending test recommendation final. En *Materials and Structures*, vol. 35, N.º 253, pp. 579-582.
- Segura, S. (2013). *Determinación de la energía de fractura para concreto reforzado con fibras cortas de acero (SFRC)*. Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en estructuras. Bogotá: Centro de Estudios de Estructuras y Materiales, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 220 pp.

# Las mallas computacionales en ámbitos organizacionales

## Computational grids in organizational environments

DAVID EMMANUEL GARCÍA CÁCERES<sup>1</sup> - RAFAEL GUILLERMO GARCÍA CÁCERES<sup>2</sup>

1. Ingeniero de sistemas de la UPTC. Ingeniero de Desarrollo - Sistemas GyG - Tunja (Colombia).

2. Profesor asociado de la Decanatura de Ingeniería Industrial de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

davemmgarcia@gmail.com - rafael.garcia@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/04/2014 Aceptado: 25/06/2014

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

### Resumen

Las mallas computacionales se han desarrollado y conformado como una potente herramienta que brinda múltiples soluciones y opciones tanto en ámbitos científicos, como académicos y empresariales. Para un porcentaje alto de profesionales, el objetivo de este tipo de infraestructura es que se convierta en un recurso global al alcance de las comunidades, que permita el trabajo colaborativo de diferentes individuos mediante recursos y redes distribuidas. Las mallas computacionales han tenido sus orígenes en la convergencia de tecnologías como las redes heterogéneas, los clústeres y los sistemas P2P (punto a punto). Así mismo, la implementación de las mallas computacionales ha permitido la aparición y el fortalecimiento de diversas tecnologías y entornos, como el *e-learning* y los ámbitos colaborativos. El objetivo de este artículo es evidenciar la presencia y el impacto de las mallas computacionales en estos últimos años y las posibilidades y oportunidades que ofrecen, así como describir y explicar conceptos y elementos que se han relacionado con las mallas computacionales.

**Palabras claves:** computación distribuida (*distributed computing*), tecnología clúster (*cluster technology*), redes heterogéneas (*heterogeneous networks*), comunidad virtual (*virtual community*), sociedad del conocimiento (*knowledge society*).

### Abstract:

Computational grids have been developed and shaped as a powerful tool that provides multiple solutions and alternatives in the scientific, academic and business worlds. For an elevated percentage of professionals, this type of infrastructure should become a global resource available to communities, so as to enable collaborative work through distributed networks and resources. Computational grids have their origins in the convergence of technologies such as clusters, P2P (peer to peer) systems, and heterogeneous networks. In addition, the implementation of computational grids has allowed the emergence and strengthening of several technologies and environments such as *e-learning* and collaborative areas. Hence, the aim of this paper is to highlight the worldwide presence and impact of computational grids in recent years, as well as the possibilities and opportunities they offer. As a matter of contextualization, concepts and elements that have been associated with computational grids are described and explained.

**Keywords:** distributed computing, cluster technology, heterogenic networks, virtual community, knowledge society.



## Nomenclatura

- TC:** trabajo colaborativo.  
**MC:** malla(s) computacional(es).  
**CV:** comunidad(es) virtual(es).

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día, para las empresas e instituciones es clave contar con sistemas y soportes informáticos que permitan optimizar sus procesos productivos, en pro de brindar un mejor servicio o distribuir un producto de mejor calidad. La ventaja tecnológica que fundamenta la implementación de un sistema informático se refleja inequívocamente en la satisfacción del cliente o consumidor vinculado a la empresa [1].

El área informática y computacional está constantemente sacudida por una inmensa y vertiginosa tendencia de mejoramiento continuo, que involucra la implementación de herramientas para el tratamiento de unidades de conocimiento, que es un novedoso formato para el manejo de datos e información. Las redes de computadores ofrecen a los ambientes empresariales la posibilidad de agilizar y mejorar sus procesos productivos, pues con la infraestructura en malla se superan fronteras físicas propias de las instituciones para enfocar el trabajo en paradigmas colaborativos. Las mallas computacionales (MC) son la evolución de los sistemas distribuidos [2], y como tal deben soportar requisitos y desafíos de este tipo de arquitecturas, para satisfacer las necesidades que requieren las organizaciones en sus actividades cotidianas.

El nivel de sofisticación del sistema depende de las necesidades de la cadena de abastecimiento. En este contexto, las redes se deben diseñar o parametrizar, en lo posible, a la medida. Los retos de este tipo de comunidades consisten en contar con mayor poder de cálculo y de almacenamiento masivo de datos, además de trabajar coordinadamente, sin importar las locaciones geográficas [3].

## ORÍGENES Y DEFINICIONES DE LAS MALLAS COMPUTACIONALES

El surgimiento de las MC se debe al ensamble de varias tecnologías, que trataron inicialmente el problema del intercambio de información entre entidades u organizaciones [2]. Se pueden citar eventos y evoluciones

tecnológicas importantes, como el desarrollo e impacto que abarcaron las redes de área local y área amplia, las cuales para su funcionamiento involucran un conjunto de componentes de *software* y *hardware* que sirven como interfaz y acceso a distintos dispositivos [4]. Al respecto, el desarrollo de clústeres, como potentes herramientas para la computación de alto rendimiento, que permiten el procesamiento en paralelo [5], la implementación de redes heterogéneas, y finalmente la expansión de la misma internet, que introdujo implícitamente numerosos ámbitos y conceptos, tales como sociedades y aprendizaje virtual [6]. Las MC permitieron un nuevo tratamiento de la información, nunca antes visto, y un aumento veloz en la globalización en el mundo, definiendo esta tendencia como “el proceso en el cual se da una integración y complementariedad de los aspectos financiero, comercial, productivo y tecnológico” [7].

Con referencia al desarrollo de la internet, es preciso afirmar que las MC van a cumplir un papel muy importante, permitiendo un nuevo salto evolutivo por medio de la homogeneización de protocolos y la expansión de sistemas basados en plataformas y sistemas operativos como Windows [8].

En la ingeniería se enseña que a partir de una necesidad clara y estable se pueden explotar diversas técnicas con el fin de dar solución adecuada a dicha necesidad. En el caso específico de las MC, es “la distribución de los recursos y la solución de problemas en organizaciones globales, dinámicas o virtuales” [9]. Para esto, las MC deben contar con una infraestructura caracterizada por la interconexión de computadores en topología tipo malla, la utilización de interfaces con protocolos y terminales de alto desempeño [ibíd.].

Para establecer un paralelismo entre una infraestructura relativamente joven, como las MC, y una infraestructura más madura y mayormente propagada como la red eléctrica, se debe entender que algunas características que deben estar presentes en ambas infraestructuras consisten en el establecimiento de una conexión habilitada y disponible en cualquier instante, junto a condiciones como seguridad, confiabilidad, transparencia y, en lo posible, facilidad de uso [3]. En este punto, lo más notorio y obvio es prever que así como ocurrió con la telefonía o la internet, las mallas desarrollarán una gestación relativamente pasiva o por lo menos eso es lo que se percibe, debido sobre todo

a que esta infraestructura puede ser más costosa de implementar y de distribuir que otras infraestructuras.

Similar a la radio vs. la televisión, la radio es mucho más barata en su implementación, su mantenimiento resulta más sencillo y por su costo puede ser más fácil de adquirir para los usuarios; en contraste, la televisión es más compleja de implementar y el costo para el usuario es mayor, pero al balancear las ventajas y los beneficios que tienen una y otra tecnología el usuario estará dispuesto a invertir más por una tecnología que va a compensar ese recaudo en el futuro. Al respecto, algo similar se viene dando con las MC, donde son principalmente los ámbitos científicos sus principales consumidores [10] y [11], pero así como la televisión, se cree que las MC van a ser muy populares, cuando se disminuya el costo de su implementación y sobre todo cuando el usuario haya evidenciado las ventajas y posibilidades que éstas proporcionan.

Las MC, al igual que las distintas topologías de redes de computadores, bus, anillo, estrella, etc., responden a un diseño de interconexión de dispositivos.

La ventaja de las MC radica en su poder de cómputo y procesamiento para “promover y robustecer la cooperación humana en entornos académico-investigativos” [12]. Actualmente ha llegado a extenderse su aplicación a campos relacionados, como la medicina, el aprendizaje virtual y la manufactura de productos industriales [13]; sin embargo, hay otros ámbitos o escenarios donde las MC servirían posiblemente de una manera más impactante como en entidades gubernamentales y empresariales, comerciales, de educación básica y el hogar.

## LAS MALLAS COMPUTACIONALES Y LOS SISTEMAS DISTRIBUIDOS

Para conceptualizar los sistemas distribuidos, se parte de la idea de que las MC se van a comportar como “una infraestructura para la computación distribuida pensada para aplicaciones que requieren elevada capacidad de procesamiento de datos en ciencia y tecnología avanzadas” [14]; en este contexto, la implementación de las MC conduciría a la utilización de los recursos informáticos y computacionales que ya existen. Según [ibíd.], hay otros recursos que deben seguir en desarrollo y evolución, tales como redes de alta velocidad y arquitecturas de procesadores multicore [2] y [15], que eventualmente han permitido el surgimiento y avance de la computación

de alto desempeño (*High Performance Computing*). Básicamente, los sistemas distribuidos o la computación distribuida se catalogan en dos infraestructuras bien definidas, que de acuerdo con [16] son la tecnología clúster y la topología en malla (*grid*), las cuales tienen a su vez un vínculo muy fuerte entre sí.

La internet presenta segmentos distribuidos debido a un tipo de arquitectura descentralizada, donde los computadores conectados o *host* pueden intercambiar ficheros y archivos entre sí. Las redes heterogéneas y en general las LAN (*local area network*) y WAN (*wide area network*) permiten que un usuario obtenga un fichero de otros computadores que están distribuidos geográficamente en diversos lugares. Según [17], los usuarios de internet han mostrado más entusiasmo y reacción favorable a la utilización de aplicaciones de intercambio de ficheros como Napster, Bittorrent o eMule, debido a que la obtención de los ficheros se hace entre distintos computadores, permitiendo mayor disponibilidad y acceso a éstos, evitando la centralización de la información, que en este caso se presentaría en el evento de que un gran servidor fuera el único que tuviera todos los ficheros e inevitablemente todas las conexiones debieran pasar por éste.

El inconveniente que tuvo que enfrentar directamente Napster fueron los episodios jurídicos que plantea un intercambio de archivos que pueden tener propiedad intelectual, derechos de autor usualmente de artistas y músicos. Richard Stallman, fundador del proyecto GNU en 1983, tiene una postura que sigue siendo discutida en cuanto a la legalización del intercambio de archivos por internet, relacionada con el uso de la práctica “natural” de reconocer los derechos mediante donaciones voluntarias de los usuarios [15]; experiencias de trabajos discográficos distribuidos por internet incluyen el álbum *In rainbows*, de la banda inglesa Radiohead. Según [18], estas estrategias permiten que las redes de computadores sirvan para dar un nuevo paso en el pensamiento de la distribución de música digital, así como de otros tipos de archivos en forma gratuita.

Así como el intercambio de archivos es uno de los atractivos más visibles de los sistemas distribuidos (en adelante SD), el intercambio de recursos es muy importante en una arquitectura de MC. Hace unas décadas, los computadores que se tenían en los hogares se restringían a labores de interfaz de usuario, básicamente, y dejaban las tareas de cómputo y proceso a los super-

computadores a los cuales se conectaban. Al respecto, la capacidad de procesamiento de los computadores se duplica cada 18 meses (ley de Moore) y el ancho total de las comunicaciones se triplica cada doce meses (ley de Gilder) [2]. De acuerdo con estas leyes, los computadores que están hoy en día en los hogares ya no se restringen tan drásticamente a interfaz de usuario, sino que cuentan con procesadores propios, unidades para almacenamiento de datos y conexiones a redes como internet. No obstante, aun hoy en día un computador de escritorio o *desktop* no se puede comparar con un *mainframe*, debido a que este último cuenta con múltiples procesadores y una gran cantidad de discos duros para el almacenamiento.

Una manera de emular el comportamiento de un gran *mainframe* consiste en la tecnología clúster, procesamiento en paralelo que consiste en “un grupo de múltiples computadores unidos por una red de alta velocidad, de tal forma que el conjunto puede ser visto como una única máquina, pero que por su poder de cómputo resuelve problemas que un solo equipo de escritorio no podría hacer” [16].

La tecnología clúster ha permitido que los computadores personales puedan utilizar recursos de cómputo de otras máquinas para enfocarse primordialmente en recibir y obtener los datos ya procesados. En una arquitectura tipo MC, existen máquinas de distintas capacidades; por un lado, están los supercomputadores, propios de las entidades con alto poder adquisitivo, entidades bancarias, comerciales o gubernamentales, y por el otro están los computadores sencillos que se dirigen al público en general que tienen un razonable costo de adquisición. [17] afirma que el reto real de las MC es la creación de una infraestructura computacional para el aprovechamiento de los recursos de las instituciones y organizaciones vinculadas, o participantes, a dicha infraestructura.

Al hablar de una computación distribuida y de componentes heterogéneos, se debe pensar en las definiciones de sinergia y entropía de la teoría general de sistemas (TGS). Según [14], las MC deben tener “la capacidad de funcionar automáticamente sin necesidad de intervención externa, y tener la habilidad de reorganizar sus componentes de forma espontánea, ser resistente a fallos, que permita el dinamismo”, y funcionar de manera descentralizada, lo que permite el crecimiento y la supervivencia de las partes del sistema. La sinergia rige

esta idea. Cuando se efectúa una verdadera integración de elementos se obtiene un resultado que es mayor que la simple suma de las partes [19].

Uno de los beneficios más significativos de las MC es el balanceo de los recursos computacionales, donde pueden presentarse dos situaciones particulares: la primera consiste en que los recursos están sobrecargados y el procesamiento se vuelve lento. La otra situación aparece cuando hay computadores “ociosos” y se desperdicia la capacidad de cómputo. De acuerdo con [8] y [15], las MC son capaces de aprovechar aquellos lapsos ociosos de los procesadores interconectados por medio de la técnica de procesamiento en paralelo.

Uno de los éxitos más relevantes e importantes que han tenido las MC en su relativamente joven existencia ha sido el llamado SETI@Home, promovido inicialmente por la agencia espacial estadounidense, al que se le unieron millones de personas en todo el mundo por medio del ofrecimiento de la capacidad de cómputo de sus máquinas para contribuir con las investigaciones del SETI, que consisten a grandes rasgos en la búsqueda de algún indicio o señal de vida extraterrestre [13]. La arquitectura que se implementó para posibilitar el SETI@Home comprende una plataforma de aplicaciones y *software* denominada BOINC, una aplicación específica que se instala en los computadores “voluntarios”, que se comporta como un *screensaver* o salvapantallas, donde más de cinco millones de personas voluntarias en 200 países ceden la capacidad de procesamiento de sus computadores para el análisis de las señales que se reciben en las antenas terrestres [20].

En este tipo de conexiones, los computadores personales de los voluntarios se comportan como una gran infraestructura, que busca aprovechar los lapsos de inactividad del procesador, y más importante aún, al tratarse de millones de procesadores conectados simultáneamente a la red, los SD cuentan con un poder de cómputo inmenso y adecuado para llevar a cabo cálculos demandantes y análisis científicos.

## APRENDIZAJE VIRTUAL

Gracias al avance vertiginoso de la informática y las redes de computadores, hoy en día se pueden implementar nuevas técnicas de aprendizaje que hace unas décadas eran impensadas o se encontraban en incipiente formulación. El aprendizaje virtual (*e-learning*) es un

nuevo ámbito (o concepto) que ha surgido gracias a la era digital [21] y [22], y que trae consigo una serie de posibilidades sustentadas en la capacidad y herramientas que ofrecen los sistemas informáticos, las aplicaciones y la internet, manifestado por ejemplo en la aparición de *e-commerce* y *e-business*.

Las MC busca poner a disposición del público los recursos necesarios de *hardware* (computadores, redes, servidores, etc.) y *software* (plataformas, sistemas operativos, protocolos, aplicaciones, etc.) para conformar y organizar una infraestructura que le permita lo que se ha definido [12] como aprendizaje mediado. Es posible que las instituciones educativas sean más propensas al llamado de participación de la MC, debido al vínculo que existe entre ellas y la comunidad científica; no obstante, como se mencionó antes, las MC pueden llegar a ser muy populares como redes de computadores.

Es necesario conceptualizar que a pesar de que la enseñanza virtual ofrece nuevas posibilidades educativas, no va a remplazar a la educación presencial y tradicional por lo menos en unas cuantas décadas, más bien, se encargará de complementar a la educación que se conoce en la actualidad [22], aquella que presenta a un grupo de alumnos interactuando directamente con un docente, juntos dentro de un recinto académico.

En este contexto, se debe tener en cuenta que para implementar una tecnología de este tipo se deben identificar qué aspectos de la educación tradicional pueden suplirse o remplazarse por la educación virtual y cuáles de ellos no. Según [23], las principales desventajas de la educación virtual corresponden a la calidad con que se pueda impartir el conocimiento, la autonomía y responsabilidad del estudiante, y por supuesto contar con una conexión a internet suficientemente fiable, así como con los respectivos recursos computacionales e informáticos (equipos y aplicaciones).

Una etapa similar a la que se presentó con los computadores portátiles (*laptops*) frente a los libros impresos se está presentando ahora con la enseñanza virtual, con el surgimiento de diversos recursos digitales como libros, revistas en línea y portales de internet, lo que ha incrementado el entusiasmo de los usuarios por adquirir y utilizar equipos portátiles. Pese a ello, los libros impresos presentan algunas facilidades, como su disponibilidad y manejo independiente de energía eléctrica y redes inalámbricas (si éstas se requieren). Con todo, la educación tradicional sigue siendo un espacio,

el espacio vital e importante en la sociedad de hoy, y no se va a sustituir o remplazar por su contrapartida virtual (*e-learning*) que debe verse como un complemento.

Cabe destacar que existe un afán para la correcta implementación de la educación virtual que permita garantizar su calidad. [21] describe los distintos tipos de evaluaciones que deben realizarse sobre el *e-learning*, que incluye minuciosos análisis que van desde la evaluación del personal docente, pasando por los materiales o recursos, multimedia, plataformas, etc., y la forma como se califica el progreso del alumno, los esquemas de apreciación y calificación. [23] propone un punto de vista desde la periferia del docente, quien debe formular una serie de preguntas claves para entender el alcance y las metas de un curso virtual específico, al igual que las herramientas y procedimientos para la consecución de buenos resultados.

[24] define muy puntualmente las tecnologías que han contribuido de una u otra forma con el aprendizaje virtual, las cuales son “el teléfono, la radio y televisión, el dinero electrónico, las redes telemáticas, las tecnologías multimedia y la realidad virtual”, entre otras, que valga decirlo pueden o no tener un vínculo fuerte con las ciencias informáticas. Adicionalmente, las aulas virtuales y las plataformas que se ponen a disposición liberan de las restricciones espaciales y temporales a los docentes, que son indispensables en la educación presencial y tradicional [ibíd.] y [25].

En la educación tradicional la cátedra se imparte en un salón de clases, donde el docente –así como el alumno– tiene unas responsabilidades y tareas que cumplir para que la cátedra sea eficiente. En este tipo de educación, los individuos están sujetos a las restricciones comentadas, que se ven reflejadas en la oportuna asistencia de los alumnos (tiempo) y a un recinto específico (espacio). Basta con fallar o incumplir con una de estas dos condiciones para que la cátedra no pueda ser transmitida y el aprendizaje pueda fracasar. Con las MC, al igual que con otras topologías, se deben establecer una serie de pautas y normas acerca de qué recursos se están compartiendo y de quién hace uso de éstos, es decir, los permisos y restricciones que deben controlar la gestión en la MC. De acuerdo con esto, se puede asumir que una infraestructura tipo malla sería conveniente, confiable, ágil y segura para plataformas virtuales y enseñanza no presencial.



Colombia cuenta con el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y éste a su vez se ha extendido a la era digital mediante el SENA virtual, donde se puede acceder a un curso virtual similar a los cursos que se realizan en los centros de capacitación, utilizando herramientas de aprendizaje que simulan los talleres y laboratorios físicos y tangibles. De acuerdo con [26], el SENA virtual “atendió a más de un millón de personas durante el 2007 y se acerca a los dos millones en el 2008, en la formación en diversos temas, con la certificación de estudios respectiva”. Este es un claro ejemplo de la motivación que existe por el intento de procurar que la educación sea accesible a más comunidades en distintas zonas geográficas y con diversas características académicas o culturales. La sociedad parece responder favorablemente al ofrecimiento y despliegue de esta tecnología, pero requiere la formación especial del cuerpo docente, ya que debe participar más activamente en las actividades de desarrollo del grupo a su cargo; de esta forma puede tener una mejor perspectiva de cuáles pueden ser las mejores metodologías, así como “negociar el trabajo a realizar” con sus estudiantes [25].

## CONCLUSIONES

1. Las MC representan el nuevo salto cuántico de los sistemas distribuidos, hacia una nueva infraestructura que presenta ventajas y funcionalidades como el procesamiento paralelo, la optimización de la capacidad de cómputo, aprovechamiento de procesadores ociosos, y la utilización de los recursos de *hardware* y *software* que existen.
2. A pesar de las ventajas que presenta una arquitectura tipo MC, se trata tan sólo de otro tipo de topología de red, como el bus, el anillo o la estrella, y se soporta en los mismos componentes básicos de *hardware*: servidores, redes, equipos personales, interfaces, etc., y *software*: protocolos, plataformas, *middleware* y aplicaciones específicas.
3. La era digital que se presencia en la actualidad trae consigo un buen número de posibilidades y herramientas que tienen un fuerte impacto en prácticamente todos los ámbitos de la actividad humana. En algunos casos, las ciencias informáticas han sido capaces de remplazar total o parcialmente una tecnología, cuando ésta entra en fase de obsolescencia o abandono; en otros casos, las ciencias

computacionales e informáticas han complementado y mejorado otros ámbitos tan importantes para la sociedad, como la educación y el aprendizaje por medio de recursos virtuales como el *e-learning*.

## REFERENCIAS

- [1] Calvo, J.A., Carrillo, J., Cuevas, G., San Feliu, T., & Tovar, E. (2001). La función informática en la empresa. *Actas de las VII Jornadas de Enseñanza Universitaria de Informática*, Jenui, 366-371.
- [2] Castro, H. (2006). *Grid Computing*: promesa de los sistemas distribuidos. *Revista Sistemas*, N.º 98. Recuperado el 5 de junio de 2013. Disponible desde internet en ([http://acishost.acis.org.co/fileadmin/Revista\\_98/4\\_Uno.pdf](http://acishost.acis.org.co/fileadmin/Revista_98/4_Uno.pdf)).
- [3] Hamar, V. (2010). *Grid Computing*.
- [4] Salvucci, G. & Virues, L. (2003). *Diseño de una red LAN*.
- [5] Valdez-Menchaca, A. G. & Campos-Posada, G. (2008). Creación de un clúster de Linux utilizando Knoppix. *Revista Digital Sociedad de la Información*, N.º 13.
- [6] Pazos, M., Pérez, A. & Salinas, J. (2001). Comunidades virtuales: de las listas de discusión a las comunidades de aprendizaje. *In Comunicación*. Edutec'01. V Congreso Internacional de Tecnología, Educación y Desarrollo sostenible.
- [7] Romero, A. (2013). Reflexiones sobre la globalización. *Revista Tendencias*, 2(2).
- [8] Morales, R. (2003). La *Grid Computing* abre las puertas al internet del futuro. *Tendencias tecnológicas*.
- [9] Díaz-Prado, V. (2005). *La estructura de la Grid Computing*. *Ciencia UALN*, 8(2).
- [10] Baeza, R. (2004). *Implementación de una malla computacional, comparación de rendimiento de MPI sobre una malla vs. métodos tradicionales*.
- [11] Fuentes, A., Vázquez, J. L., Montero, R. S., & Llorente, I. M. (2005). Beneficios del uso de la tecnología *Grid Computing* en bioinformática usando la infraestructura de IRISGrid. *Boletín de RedIRIS*, 72.
- [12] Mendoza-Moreno, M. A. (2011). Mallas computacionales y la integración multimedial para la colaboración investigativa virtual. *Revista Virtual Universidad Católica del Norte*, 1(30).
- [13] Ríos, B. & Joyanes, L. (2009). *Grid Computing*. *Revista SG Software Guru*.
- [14] Ardaiz, O., Díaz de Cerio, L., Freitag, F., Gallardo, A., Marqués, J. M., Messeguer, R., Navarro, L. & Sanjeevan. K. (2004). Sistemas distribuidos y CSCL. *Inteligencia Artificial*, 8(24).
- [15] Millán-Tejedor, R.J. (2007). *Grid Computing. Manual Formativo*, N.º 43.
- [16] Mesa Múnera, A. & Branch Bedoya, J.W. (2008). Implementación de un clúster homogéneo para la resolución de problemas de alta complejidad computacional. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 5(3).
- [17] Marquès i Puig, J.M., Vilajosana i Guillén, X., García López, P. A. (2008). *Arquitecturas, paradigmas y aplicaciones de los sistemas distribuidos*.
- [18] Benavent, D. (2007). *Radiohead: In Rainbows*. Recuperado el 16 Julio de 2013. Disponible en (<http://www.fanzinedigital.com>).
- [19] Clark-Gavilán, M.P. (2008). *Sinergia en las empresas para maximizar el crecimiento*. Recuperado el 20 de julio de 2013. Disponible en (<http://paginasweb.bligoo.com>).

- [20] Martín, J. (2009). *SETI@Home: décimo aniversario*. Recuperado el 22 de julio de 2013. Disponible en (<http://muycomputer.com>).
- [21] Rubio, M.J. (2003). Enfoques y modelos de evaluación del *e-learning*. *Revista Electrónica de Investigación y Evaluación Educativa (Relieve)*, 9(2).
- [22] Cordero-Madrigal, H. (2005). *E-learning*. Recuperado el 26 de julio de 2013. Disponible en (<http://www.scribd.com>).
- [23] Cabero-Almenara, J. (2006). Bases pedagógicas del *e-learning*. *Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento*, 3(1).
- [24] Bello-Díaz, R.E. (2008). *Educación virtual: aulas sin paredes*. Recuperado el 2 de agosto de 2013. Disponible en (<http://www.educar.org>).
- [25] Barbera, E. & Badia, A. (2005). Hacia el aula virtual: actividades de enseñanza y aprendizaje en la red. *Revista Iberoamericana de Educación*, 36(9).
- [26] Daccach, J.C. (2009). *Sena virtual*. Recuperado el 5 de agosto de 2013. Disponible en (<http://www.deltaasesores.com>).



# 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).





# Entregando lo mejor de los **colombianos**

Línea de atención al Cliente Nacional: 01 8000 111 210

Línea de atención al Cliente Bogotá: (57-1) 4199299

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