

CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ

VOCALES GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS
SANDRA XIMENA CAMPAGNOLI MARTÍNEZ
ÁLVARO ANTONIO GONZÁLEZ FLÉTCHER
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
RICARDO SALAZAR FERRO
HENRY MORENO MOSQUERA
(representante de los profesores)
GINA NATHALIA LEÓN ACOSTA
(representante de los estudiantes)

RECTOR HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ

SECRETARIO RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

DIRECTOR JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

COMITÉ EDITORIAL GERMÁN ACERO RIVEROS
CLAUDIA JEANNETH RÍOS REYES
PAULA XIMENA RÍOS REYES
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
EDUARDO SARMIENTO PALACIO

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 # 205-59
TEL.: (57-1) 668 3600, EXT. 533
revista@escuelaing.edu.co
BOGOTÁ, D.C., COLOMBIA

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

5 / EDITORIAL

Salud pública

Jairo Alberto Romero Rojas

7-23

Teorías del crecimiento y la distribución para una nueva era

Eduardo Sarmiento Palacio

Palabras del autor en la presentación de su más reciente libro.

25-34

Remoción de manganeso en la planta de tratamiento de agua potable de Tocancipá (Cundinamarca)

Diana Isolina Barrera Martínez - Jairo Alberto Romero Rojas

En este proyecto de investigación se evalúa la remoción de manganeso en el sistema de tratamiento convencional de agua potable del municipio de Tocancipá, ya que este elemento químico ha generado dificultad para ser removido y cumplir permanentemente con el valor máximo permisible, de conformidad con la Resolución 2115 de 2007.

35-40

Análisis del comportamiento de barras corrugadas posinstaladas con adhesivo epóxico en concreto ligero, sometidas a tensión y cortante

Carolina Viasús Arteaga - Pedro Nel Quiroga Saavedra

Se plantea un programa experimental, en el cual se analiza el comportamiento de barras corrugadas ancladas en concreto liviano. Para esto, se construyeron 7 losas macizas de concreto, en las cuales se anclaron 39 barras corrugadas; 33 de estos anclajes se ensayaron a tensión, mientras que las seis barras restantes se ensayaron a cortante. Es importante mencionar que la resistencia del concreto fue de 21 MPa.

41-45

Detección de *Legionella pneumophila* y su impacto en salud pública en el agua potable de un hospital municipal

Paula Julieth Herrera López - Gladys Rocío González Leal

El objetivo principal de este artículo consiste en evaluar la presencia de *Legionella pneumophila* en muestras de agua tomadas de tres puntos de un hospital municipal; si bien no es habitual su detección, sí son bastante oportunas su identificación, cuantificación y posible eliminación del recurso hídrico.

47-52

Tratamiento de agua residual proveniente del beneficio de conejos

Diana Marcela Carrillo Parra - Jairo Alberto Romero Rojas

En este artículo se muestra el diseño conceptual de tres opciones para el tratamiento de las aguas provenientes del proceso de beneficio de conejos de una empresa ubicada en El Rosal (Cundinamarca), de acuerdo con la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual.

53-67

Determinación de factores de resistencia para cimentaciones superficiales y profundas en Bogotá, D.C.

Yudy Esleydi Vanegas Aguirre - Carlos E. Rodríguez P.

En este artículo se desarrolla la obtención de factores de resistencia a escala local (Bogotá, D.C.) para cimentaciones superficiales y profundas, partiendo del análisis estadístico de parámetros de resistencia obtenidos de diferentes tipos de ensayos, para establecer su distribución y posteriormente realizar el análisis probabilístico.

69-79

CONMEMORACIÓN CENTENARIA (1920-2020)

Julio Garavito Armero

Breve semblanza sobre su vida, obra y época como ingeniero, profesor, matemático y astrónomo

Gabriel Humberto Pulido Casas

En este artículo se condensan aspectos selectivos de algunos trabajos elaborados por el autor respecto a la vida, obra y época de don Julio Garavito Armero, ilustre personaje, considerado gloria de la ciencia y de la ingeniería colombianas.

Representa una contribución al conjunto de conmemoraciones que la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito ha programado con ocasión del centenario del fallecimiento de este distinguido colombiano.

81 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

Salud pública

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería

jairo.romero@escuelaing.edu.co

Como lo define la Organización Mundial de la Salud (OMS), la aspiración de cualquier ciudadano es tener siempre salud: estado de completo bienestar físico, mental y moral.

El problema actual, creado por la contaminación con la covid-19, despierta y revive la importancia de tener salud, y demuestra que nos hemos olvidado de hacer lo necesario para satisfacer óptimamente el objetivo social primordial de brindar salud a todo ciudadano.

Ojalá la coyuntura actual obligue a reconocer que para la prevención y la curación de una enfermedad se requieren conocimientos apropiados, vacuna preventiva, tratamiento efectivo, personal médico idóneo y capacidad hospitalaria suficiente.

Con el aislamiento y la cuarentena como estrategias de salud pública comunes adoptadas como medida política por parte del Estado, sólo se busca prevenir la propagación de una enfermedad respiratoria altamente contagiosa. Por eso, el distanciamiento social y las coberturas faciales contra emisiones e inmisiones respiratorias son claves a la hora de impedir la transmisión de una enfermedad de este tipo, como la gripa por covid-19.

Sin embargo, la gripa ha sido, es y será acompañante permanente del ser humano; por este motivo, la cuarentena no puede ser constante porque elimina el derecho irrenunciable a disfrutar de nuestra actividad social, profesional y laboral.

Reabrir todas las actividades económicas, sociales, educativas, deportivas, culturales y laborales es, evidentemente, una necesidad urgente, pero lo que se observa es un conjunto de medidas para responsabilizar al individuo o a sus empleadores de su protección individual, lo cual es simplemente responder con el aviso clásico de “Transite bajo su propia responsabilidad”, como si alguna vez se pudiera vivir sin responsabilidad propia.

Corresponde al Estado proveer salud pública mediante el aporte de los recursos económicos necesarios para brindar todos los medios y la seguridad requeridos para preservar el bienestar físico, mental, social y moral de la ciudadanía, condición esencial para tener una vida feliz.

A los ingenieros, la pandemia nos ha enviado su mensaje: mantengamos creciente nuestro aporte a la salud pública con nuestra permanente contribución al sostenimiento de un ambiente ideal de agua, aire y suelo sanos.

Teorías del crecimiento y la distribución para una nueva era (Presentación de su más reciente libro)

EDUARDO SARMIENTO PALACIO

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

eduardo.sarmiento@@escuelaing.edu.co

Recibido: 10/03/2020 Aceptado: 12/03/2020

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

CRECIMIENTO ECONÓMICO

En diferentes partes de la obra afirmo que la ciencia económica se concibió dentro de una excesiva dependencia del concepto de equilibrio. Se considera que las economías operan dentro de condiciones ideales, que se asemejan a las ciencias físicas y matemáticas, las cuales tienen el mayor grado de aproximación por tratarse de fenómenos materiales homogéneos. Los avances de la ciencia económica han fallado por la debilidad de los fundamentos científicos.

La ciencia económica parte de una relación que no ofrecía mucha información: la suma de las ofertas y las demandas es igual a cero. En términos algebraicos, se tiene la siguiente relación:

$$\sum_i^n p_i (X_i^D - X_i^S) = 0$$

Donde X_i^D demanda, X_i^S oferta, p_i precios.

Say fue el primero en emplear la expresión. Sin ninguna base científica proclama que el comportamiento que se observa para el conjunto del sistema se presenta a niveles agregados en todas las actividades. Las ofertas y las demandas se igualan en todos los mercados.

Adam Smith le da mayor contenido económico al señalar que las confrontaciones individuales para obtener la máxima ganancia y la mayor utilidad, que se pueden asimilar al caos, son normalizadas y reguladas por el mercado y la competencia, que conduce a estados en que las ofertas y demandas se igualan, la producción alcanza el máximo y los beneficios individuales se convierten en beneficios para toda la sociedad. En fin, el progreso y el mercado conducen al orden y la coherencia; por el contrario, Marx clamaba que el progreso y los beneficios de los capitalistas engendraban su propia destrucción.

El aporte científico más relevante lo hizo Walras en 1874. Las ecuaciones, o si se quiere las ofertas y demandas, se definen en términos de los precios y se

encuentra que en virtud de que la demanda tiende a subir los precios y la oferta a bajarlos, se genera una dinámica en la que finalmente se igualan en todos los mercados. Se configura un estado del equilibrio en el que en cada mercado hay fuerzas que tienden a mantenerlo en la posición inicial y en conjunto conducen a un estado en que las ofertas se igualan en todos los mercados y se alcanzan la máxima producción y el mayor consumo. El libre juego del mercado garantiza que la sociedad emplea al máximo sus recursos y logra un efecto inimaginado sobre el bienestar de los ciudadanos.

La existencia de la solución fue materia dominante de investigación y análisis económico. Se dice que los economistas se gastaron 35 años contando el número de ecuaciones y variables y nunca encontraron la solución. La solución óptima se daba para algunos precios y cantidades negativos. La explicación era simple: debido a la inelasticidad de la demanda de los precios de muchos bienes, el número de ecuaciones es mayor que el número de variables. El mercado conduce a soluciones múltiples. Las ofertas y las demandas no se igualan en todos los mercados. En unas áreas, las ofertas y las demandas se igualan; en otras, la oferta excede la demanda, y en las restantes, la demanda excede la oferta. No se cumple la ley de equilibrio competitivo. Las ofertas y las demandas no se igualan en todos los mercados y la competencia no conduce a la solución óptima.

En lugar de reconocer el veredicto del álgebra más elemental, los pensadores procedieron a buscar la solución en las teorías avanzadas de matemáticas de punto fijo y convexidad. En efecto, Arrow y Debreu proclamaban que las economías tienden a un equilibrio en que las ofertas y las demandas se igualan, y en los sectores con exceso de oferta llegan a cero. El resultado se recibió con mucho entusiasmo, pero no avanzó con respecto a los trabajos anteriores. En general, se sostiene que los excesos de demanda se igualan a cero en los conjuntos convexos. Si bien el resultado se cumple

en los sectores que operan con exceso de demanda, no ocurre lo mismo en los sectores con exceso de oferta, que no pueden bajar los precios indefinidamente hasta hacerlos iguales a cero. Mientras los excesos de demanda disminuyen, los de oferta persisten. De acuerdo con la ley de Walras, unos sectores operan con exceso de oferta, otros con exceso de demanda y el resto con la igualdad. El sistema no tiende al equilibrio.

El problema es simple. El equilibrio competitivo se fundamenta en el supuesto de que el conjunto de la economía es convexo. El exceso de demanda y los precios están inversamente relacionados. En virtud de la ley de Walras, las ofertas y las demandas se igualan en todos los mercados. El resultado no se cumple porque el conjunto no es convexo. Si bien en condiciones de exceso de demanda los precios son presionados al alza y reducen la demanda, en condiciones de exceso de oferta el precio no desciende hasta igualar a cero. De acuerdo con la ley de Walras, unos sectores operan con exceso de demanda, otros con exceso de oferta y los restantes con igualdad. La solución de equilibrio competitivo en que las ofertas y las demandas se igualan en todos los mercados no se cumple.

Sin embargo, no todo está perdido. La solución se encuentra en el desequilibrio, y está representada por los sectores de baja elasticidad de los precios con exceso de oferta y los de alta elasticidad con exceso de demanda. Los sectores de baja elasticidad de los precios operan con exceso de oferta y los productos con alta elasticidad de los precios operan con exceso de demanda. La solución no es óptima. En unos sectores, la producción es determinada por la demanda y en otros, por la oferta. La producción y la eficiencia aumentan en la medida en que se amplía la demanda de los primeros y se modera la de los últimos.

Es claro que la economía no tiende al equilibrio competitivo por la vía del mercado. Las economías se encuentran en un estado de desequilibrio y producción por debajo del potencial. La máxima eficiencia se consigue ampliando la demanda por bienes industriales y agrícolas y moderando la de los servicios. El sistema funciona en un estado de ecuaciones mayores que el número de variables. La solución está en transformar el modelo mediante la ampliación de las variables de estado en un marco de más propósitos que objetivos. En la práctica, se consigue con una acción integrada para ampliar la industria, la agricultura y el empleo.

El libre juego del mercado garantiza que la sociedad emplea al máximo sus recursos y logra un efecto inimaginado sobre el bienestar de los ciudadanos.

El resultado de Arrow-Debreu tuvo una incidencia enorme en el pensamiento colectivo. Se interpretó como una evidencia científica de los poderes del mercado y de su capacidad para la eficiencia. Las concepciones alternativas se califican de populistas sin verificación práctica. El neoliberalismo se fortaleció y le abrió camino a la reforma de la globalización, que empleaba los poderes del mercado para redimir las imperfecciones de las sociedades quebrantadas. Lo más grave es que sirvió de disculpa para excluir la innovación de Keynes en la teoría económica formal, como sus demostraciones de la invalidez de la ley de Say, y para frenar sus aportes institucionales, como los acuerdos de Bretton Woods, la intervención del Estado en el empleo y la integración comercial.

Las condiciones del crecimiento son más complejas. A las fallas de la asignación de recursos, se agregan las de las relaciones intergeneracionales. La diferencia entre las variables y ecuaciones es aún mayor que en la asignación de recursos. Las deficiencias estructurales amplían el número de ecuaciones.

A las falencias de la teoría se juntó la lentitud de la academia para incorporar las transformaciones de la realidad. Luego de que las economías crecían por debajo de la población, en el siglo XVIII se registraba un cambio drástico. El estado normal de las economías pasa a ser el crecimiento. El monumental cambio de comportamiento sólo se viene a reflejar en la teoría del crecimiento en el siglo XX.

No es aventurado reconocer que el mercado deja la marcha de la economía a la deriva. Si a las deficiencias de la asignación de recursos se agregan las intertemporales, que ponen el capital por encima del crecimiento económico y el salario por debajo de la productividad, el sistema evoluciona dentro de un marco de desequilibrio. En este entendido, es posible avanzar. La armonización entre los instrumentos y los propósitos requiere operar sobre una amplia gama de frentes.

El mercado conduce a un proceso indefinido. El máximo crecimiento está condicionado a la presencia del Estado para configurar un marco de más instrumentos que propósitos. En términos generales, se requiere un modelo de amplias acciones en la macroeconomía, el comercio internacional, las prioridades sectoriales y el mercado laboral.

El sistema se asimila al marco planetario de Tolomeo, que gira alrededor de la Tierra. La formulación mate-



mática está dada por un número de ecuaciones mayor que el de variables. El sistema sólo puede sostenerse con la intervención de una criatura divina. La realidad sólo vino a disiparse con la teoría del movimiento de Newton, que estableció que los cuerpos se atraen y repelen de acuerdo con su masa. Al final, se llegó al sistema en que el número de ecuaciones y variables se iguala y se mantiene por su propia cuenta.

Hasta finales del siglo XVIII, las economías se mantenían estáticas. La producción crecía menos que la población y no había mayor diferencia entre los países. Se tenían economías agrarias con rendimientos decrecientes a escala. La producción se determinaba en todos los lugares por medio de la energía humana y la energía animal. Las condiciones cambiaron con el descubrimiento de la máquina de vapor y la energía eléctrica. Las economías pasaron a ser impulsadas por el capital, representado en las máquinas. Los resultados no se hicieron esperar. A comienzos del siglo XIX, Estados Unidos e Inglaterra, los países de mayores avances tecnológicos y los descubrimientos de nuevas ideas y su inversión en usos, crecen por encima de la población. Luego, en la segunda parte del siglo, estos patrones de comportamiento los reproducen los países continentales de Europa, como Alemania, Francia, Holanda y Suiza. La gran sorpresa fue Japón, que en la segunda parte del siglo XX crece a tasas muy superiores a las del resto del mundo. En menos de 40 años logra el mismo avance que Europa y Estados Unidos en 200 años. No menos sorprendente es la hazaña de los tigres asiáticos, Corea, Taiwán, Singapur y Hong Kong, que formaban parte de los llamados países en desarrollo. Ciertamente, el progreso mundial llegó a América Latina, que entró a formar parte de los países que crecían más que en el pasado, aunque en dimensiones menores.

La respuesta académica se vino a ver en el siglo XX y se complicó por la concepción de equilibrio. El cambio en las condiciones mundiales no tuvo una rápida respuesta del pensamiento académico, que se mantuvo dentro de las condiciones estáticas tradicionales. El aporte más sobresaliente corrió por cuenta de Harrod-Domar a comienzos del siglo XX.

La formulación inicial de Harrod-Domar, que supone que el crecimiento es determinado por el capital, da lugar a discrepancias e inconsistencias entre la oferta y la demanda. La igualdad está condicionada a una seria intervención del Estado en la inversión. Así, el crecimiento económico estaría dado por la expresión $G(Y) = s \frac{Y}{K}$, donde s es la tasa de ahorro y Y/K la productividad del capital.

Solow, que cuestionó drásticamente este resultado, planteó como alternativa una función de producción de alta sustitución entre el capital y el trabajo. La igualdad entre la oferta y la demanda se da por conducto de la tasa de interés, en tanto que la conciliación entre el ingreso y el gasto se efectúa por la vía del mercado. Al final, resulta que el efecto capital desaparece y que el crecimiento es determinado por el empleo y el cambio tecnológico.

Lo cierto es que durante el siglo prevalecieron las diferencias antagónicas. El dilema se resuelve con pálpitos ideológicos. Pues bien, la información empírica de los últimos 60 años muestra que ambas visiones son equivocadas. El crecimiento económico es determinado en todas partes por el capital y la tecnología, y la importancia varía con la naturaleza de los países. El primero se presenta en mayor magnitud en los países en desarrollo y el segundo, en los países desarrollados. En cualquier caso, el balance favorece a Harrod-Domar. En todas partes, el efecto del capital predomina sobre el de la tecnología. En Colombia y América Latina, el capital explica más del 50 % y la tecnología, menos del 20 %.

En el libro, las dos formulaciones se concilian con una función de producción Cobb-Douglas, con un coeficiente cercano a uno del capital, como lo sugiere la evidencia estadística. El crecimiento estaría dado por la siguiente expresión:

$$G(Y) = \frac{\partial}{1-\partial} G\left(\frac{K}{Y}\right) + \frac{\beta}{1-\partial} (g(L) + G(A))$$

Donde $G(Y)$ crecimiento del producto, $G(L)$ crecimiento del trabajo, $G(A)$ crecimiento de la tecnología, ∂ coeficiente del capital y β coeficiente del cambio tecnológico.

De allí resulta que el capital explica más del 50 % el crecimiento y la tecnología menos del 25 %, de acuerdo con las características de los países.

Las teorías de crecimiento dominantes están fundamentadas en el equilibrio competitivo. En todos los mercados y en el conjunto, las ofertas y las demandas se igualan. Las únicas fuentes de expansión son el ahorro o la innovación tecnológica. No es cierto. Debido a las imperfecciones que impiden la igualación de las ofertas y demandas, y a las deficiencias estructurales que reducen el ahorro, quiebran la consistencia entre la inversión y el ahorro, limitan la especialización en actividades de ventaja comparativa, mantienen el desempleo con salarios positivos, facilitan el predominio de los recursos naturales y excluyen a la industria. En tal contexto, el crecimiento económico depende de los principales componentes de la economía. Las alteraciones e interacciones de las partes tienen una alta incidencia en el todo, representando en los mercados y el crecimiento.

La solución de la teoría del crecimiento para sostener el equilibrio competitivo es suponer que la productividad del capital tiende a cero, y que la productividad, la innovación y el avance tecnológico son constantes, al igual que los descubrimientos de las nuevas formas de producción. La tecnología es un factor indefinido de expansión. Los descubrimientos de hoy no afectan los del futuro. Se desconoce que la capacidad del mundo para generar nuevas tecnologías y conocimientos, y sobre todo los medios para convertirlos en usos, varían con el tiempo. Así, los monumentales descubrimientos de la tecnología en las dos primeras revoluciones industriales no redujeron las posibilidades del futuro. La tecnología tiene una duración infinita. Los descubrimientos de hoy aumentan las posibilidades de los del futuro.

La información estadística muestra una relación muy distinta. El coeficiente de expansión del residuo tecnológico en la función de producción tiende a descender con el tiempo. De acuerdo con las estimaciones de Gordon, la contribución actual del crecimiento es la cuarta parte de la registrada al comienzo del siglo XX y tiende a decrecer en la medida en que se presenten descubrimientos exitosos. En términos simples y sintéticos, el avance tecnológico, al igual que los factores de

producción, está expuesto a productividades marginales decrecientes.

La tecnología no es un motor que pueda impulsar por sí solo la economía. La productividad de la tecnología disminuye en la medida en que aumenta el nivel. El coeficiente de expansión tiende a descender con el transcurso del tiempo.

Aún más dicentes son los retornos crecientes a escala. Debido a la alta complementariedad con otros factores de sistema económico, la contribución del capital es cercana a uno y no desaparece. La relación capital-producto sube y puede sostenerse con la elevación del ahorro.

En la formulación de equilibrio de Solow, y en general de equilibrio competitivo, se encuentra que el crecimiento y la equidad son separables. La primera ilustración aparece cuando el crecimiento es determinado exclusivamente por el cambio tecnológico. El crecimiento es neutral, e incluso ligeramente equitativo, porque los beneficios del conocimiento recaen en buena medida en el conocimiento y el trabajo. Lo mismo se puede decir del modelo de equilibrio competitivo, en el que las ofertas y las demandas se igualan en todos los mercados. El crecimiento económico es neutral y, en particular, no afecta la distribución del ingreso. Las cosas son diferentes cuando existen imperfecciones en el mercado y deficiencias estructurales en las áreas críticas. El comportamiento de la economía es determinado por un sistema de más ecuaciones que variables.

El intento de los pensadores económicos de convertir el crecimiento económico en equilibrio deforma totalmente la realidad. En unos casos, es determinado por el capital, y en otros, por el avance tecnológico. Las acciones de política económica resultan totalmente diferentes de las previstas.

La verdad es que el crecimiento económico es altamente influido por el balance macroeconómico entre el ahorro y la inversión, la estructura del sector externo de importaciones y exportaciones, el mercado laboral, el predominio en recursos naturales y la exclusión de la industria y el empleo. En términos matemáticos, lo determina un sistema de más ecuaciones que variables. El mercado da lugar a múltiples soluciones y *a priori* no se sabe cuáles son las más eficientes.

En condiciones de libre mercado, el crecimiento lo determinan los componentes centrales del sistema económico. El mercado no conduce a la solución más

La tecnología no es un motor que pueda impulsar por sí solo la economía. La productividad de la tecnología disminuye en la medida en que aumenta el nivel. El coeficiente de expansión tiende a descender con el transcurso del tiempo.

eficiente. El máximo crecimiento está condicionado a la intervención amplia del Estado en todas las áreas de la economía. En términos concretos, adquiere la forma de una estrategia abierta para que el ahorro, el capital, el balance de las cuentas externas y la industria crezcan por encima del producto nacional. En el siguiente capítulo se mostrará cómo esta solución deteriora la distribución del ingreso y, en consecuencia, su aplicación debe acompañarse de acciones complementarias.

DISTRIBUCIÓN DEL INGRESO

Antecedentes de la teoría fundamentada en equilibrio

El análisis en las economías se fundamenta en la concepción de equilibrio. Las fuerzas del mercado y la competencia dominan sobre cualquier otra. Todas las economías tienden a estructuras productivas similares. La formulación económica se reduce a comportamientos estilizados. El problema se reduce a promediar la información de los distintos países sin contemplar las causas.

La distribución del ingreso se atribuye a factores que se dan por igual en todos los países. Se equivocan en materia grave. La distribución del ingreso es determinada por múltiples variables, que inciden de acuerdo con las características de las economías. Su desconocimiento da lugar a formulaciones que de entrada discrepan de la realidad. El fracaso de la teoría de la distribución del ingreso es que nunca avanzó en precisar los fundamentos científicos. La distribución del ingreso carece de una teoría que explique sus causas, en parte porque el equilibrio está fundamentado y conduce a soluciones perfectas. Se interpreta como un fenómeno incierto, que se resuelve en los resultados.

La concepción de la distribución del ingreso de Koopmans, el Banco Mundial y los neoclásicos, con la

escuela de Chicago a la cabeza, está fundamentada en el equilibrio competitivo. La fuerza del mercado predomina sobre cualquier otra. Las economías tienden a estados en que las ofertas y las demandas se igualan en todos los mercados. La producción y el crecimiento alcanzan la máxima eficiencia y son independientes de la distribución del ingreso. La política fiscal está en capacidad de mejorar la distribución del ingreso, sin afectar el crecimiento óptimo. En cierta manera, se revive la ley de Say, que establece que el mercado conduce a la máxima eficiencia y la política fiscal mejora la distribución del ingreso. En las críticas de Keynes y Lange al incumplimiento de la ley de Say como causa del desempleo y la recesión, ahora aparece también como la responsable del deterioro de la distribución del ingreso.

El mundo real está expuesto a deficiencias estructurales, el mercado no conduce a la máxima producción y el efecto sobre la distribución del ingreso es incierto. En el caso de las diferencias estructurales identificadas a lo largo de la obra, los efectos sobre la distribución del ingreso son indefinidos; el crecimiento y la distribución del ingreso están inversamente relacionados. Se tiene un sistema de más variables que ecuaciones, como ocurre con el modelo de Walras cuando los precios no son iguales a cero en los mercados con exceso de oferta. El crecimiento económico impulsado por el mercado deteriora la distribución del ingreso.

El diagnóstico y la predicción de la distribución del ingreso carecen de una teoría que explique sus causas, en parte porque el equilibrio conduce a soluciones perfectas. Es un fenómeno desconocido, que sólo se resuelve en los resultados.

No es cierto que las fuentes de crecimiento sean el aumento del ahorro y la capitalización. Debido a las imperfecciones del mercado, que obstaculizan la igualación de las ofertas y las demandas, y a las deficiencias estructurales, que impiden la consistencia entre el ahorro y la inversión, la especialización en actividades de ventaja comparativa, la alta productividad del trabajo y el liderazgo de la industria, el mercado impulsa la producción a cambio de la ampliación de las desigualdades. En tal contexto, el crecimiento económico depende de los principales componentes de la economía. Los desequilibrios de los mercados reducen el crecimiento.

Así, en condiciones de libre mercado el crecimiento es determinado por los componentes centrales del sistema, tales como el balance entre el ahorro y la inversión,

el vínculo entre el ingreso nacional y el gasto, el desajuste externo causado por las discrepancias provenientes de las limitaciones de las actividades de ventaja comparativa, el bajo ahorro, el mercado laboral, el predominio de los recursos naturales y la exclusión de la industria. El intento de los pensadores de convertir el sistema complejo en equilibrio ha deformado totalmente la realidad. Se tiene una teoría perfecta para un mundo imperfecto. Las acciones de política económica resultan totalmente distintas de las previstas. No se advierte que el crecimiento económico es altamente influido por el balance entre el ahorro y la inversión, la estructura del sector externo de importaciones y exportaciones, el mercado laboral, el predominio de los recursos naturales y la exclusión de la industria. Así las cosas, el crecimiento económico es determinado por un sistema de más ecuaciones que variables. No se sabe *a priori* cuáles son las soluciones más eficientes. La solución óptima sólo se puede lograr mediante una abierta intermediación y conciliación de los conflictos por conducto del Estado, que puede sintetizarse en un marco en que el ahorro, el capital, el sector externo, la educación y la industria crecen por encima de la población.

Precisamente, el impacto inicial de Piketty con su libro *Capital en el siglo XXI* estuvo en que creó la ilusión del descubrimiento de las causas de la distribución del ingreso, que se habían ocultado durante siglos. La desilusión no podía ser más grande. La distribución del ingreso se atribuye a la elevación de la relación capital-producto, que es un fenómeno que siempre se ha presentado por simples razones tecnológicas, y a la elasticidad de sustitución mayor que uno, que es controvertida por las evidencias históricas nacionales e internacionales. El capital propicia crecimientos menos que proporcionales en el producto.



Las deficiencias estructurales ocasionadas por la limitación de la ventaja comparativa, la inelasticidad del ahorro a la tasa de interés y el desempleo inducen fuerzas de mercado que deterioran la distribución del ingreso. Los dos propósitos del crecimiento y la distribución del ingreso dan lugar a un abierto conflicto, que sólo se puede superar con la intervención del Estado dentro de un marco de más o igual número de instrumentos y objetivos. En términos generales, se plantea la coordinación entre la política monetaria y fiscal, la protección cambiaria y comercial orientada a propiciar la expansión de los bienes de mayor productividad del trabajo y la demanda, la elevación del ahorro del capital por medios administrativos, el ajuste del salario de acuerdo con la productividad del trabajo, la prioridad sectorial a la industria de la agricultura, y el freno al petróleo y la minería. Todo esto se puede lograr dentro de un marco de planeación indicativa.

Uno de los principales hallazgos de la investigación está en el fuerte vínculo entre el crecimiento y la distribución del ingreso en condiciones de desequilibrio, ocasionada por las deficiencias estructurales. Los estímulos de mercado tienden a favorecer a los sectores de mayores ingresos. La ilustración más clara está en la inelasticidad del ahorro a la tasa de interés, que induce a colocar la tasa de interés por encima del crecimiento y el salario por debajo de la productividad del trabajo. Lo mismo puede decirse de un estado de exceso de ahorro, ocasionado por la tasa de interés cero. La economía ha quedado abocada a una deficiencia de demanda por la política monetaria restrictiva. El salario es determinado por la demanda. La eliminación de la restricción daría lugar a una elevación de los precios y a la baja del salario real. Algo similar ocurre con el comercio internacional. La falla de demanda por los bienes de ventaja comparativa y la industria induce a producir bienes sin ventaja comparativa, con salarios por debajo de la productividad de los bienes de ventaja comparativa.

La distribución del ingreso se busca con cifras dispersas y comparaciones de los países. Se presume que es un fenómeno externo, el cual se puede corregir con medidas globales y generalistas, aplicables en todos los países. Ni más ni menos se prescinde de análisis especial de las economías y las regiones.

La formulación y el diagnóstico de Kuznets, los clásicos, Piketty y Lucas se basan en la falsa hipótesis de que el crecimiento económico y la distribución del

ingreso son independientes o que la distribución del ingreso es un fenómeno a corto plazo. Los países se vieron abocados a un proceso de deterioro en la distribución del ingreso que llevó a adoptar políticas que terminaron debilitando el crecimiento. El resultado fue el deterioro del crecimiento, y el debilitamiento de la distribución del ingreso.

El error común de todos los pensadores de la distribución del ingreso es que no encontraron las causas o, si se quiere, los fundamentos centrales de la inequidad. No fueron más allá de las adivinanzas. En la obra, se atribuye a un abierto conflicto con el crecimiento, ocasionado por un sistema en desequilibrio de más ecuaciones que variables. La conciliación de los dos propósitos, es decir, la solución, está en la ampliación de las variables de Estado. En otras palabras, la extensión de la intervención gubernamental para igualar el número de propósitos e instrumentos. En términos concretos, se plantea actuar para moderar las deficiencias estructurales del sistema.

En los análisis predominantes, la distribución del ingreso se atribuye a factores indefinidos e inciertos, y lo más grave, independientes del sistema económico, en particular el crecimiento. Kuznets lo atribuye al fin del dualismo, los neoclásicos a factores que no afectan el crecimiento ni la economía ni tampoco la asignación de recursos, y Piketty lo achaca a la elasticidad de sustitución mayor que uno, que es controvertida por los hechos de un siglo. En contraste, en nuestra teoría se atribuye a los conflictos con el crecimiento y la asignación de recursos causados por las deficiencias estructurales del sistema, que dan lugar a más ecuaciones que variables.

La solución está en poner el mercado en su sitio. Se requeriría la abierta intervención del Estado con criterio de equidad y no de meritocracia. La simple política fiscal en un marco de libre mercado no evita la reducción del trabajo en el producto nacional y el deterioro del coeficiente de Gini. En Colombia y América Latina, la simple política fiscal de impuestos es insuficiente para garantizar la equidad. Están muy lejos del estado de bienestar en Europa. El coeficiente de Gini, antes y después de impuestos, es similar. Lo mínimo que se requiere es que los sectores más favorecidos reciban una participación en la tributación similar a la de la población.

Es necesario ampliar la intervención del Estado en la producción. En el consenso neoliberal y socialdemócrata, la presencia del Estado se limitaba a la política fiscal. Hay que impulsar la producción mediante un cambio

La ineffectividad de la política social se ha acentuado con el traslado de la administración al sector privado.

En salud, educación y seguridad social, los ingresos de los servicios se realizan mucho antes que los gastos.

La diferencia es una renta que varía con las características institucionales.

en la estructura económica, la industrialización y el fortalecimiento del estado de bienestar, para moderar las ganancias del sistema financiero.

En las concepciones de equilibrio se desconoce la influencia de las características propias de los países en la distribución del ingreso. Se da por hecho que el efecto de los choques de la distribución del ingreso, como la globalización, es igual en todos los países. No es cierto. En Europa se evitó con la política fiscal y en Corea, con el cambio de la estructura productiva. En América Latina se vio amplificada por la estructura productiva altamente dependiente de la mano de obra y los recursos naturales, así como por la ineficacia de la política fiscal de transferencias.

La distribución del ingreso nunca se entendió después de Ricardo, Marx y Domar, porque descansó sobre una teoría de crecimiento de equilibrio que hasta ahora se reconoce que fue controvertida por los hechos. Lo mismo se puede decir de las teorías de asignación de recursos que suponen que las ofertas y las demandas se igualan en todos los mercados, y que los factores se pagan de acuerdo con la productividad.

En las teorías de equilibrio competitivo, la distribución del ingreso se busca con procedimientos que se presentan por igual en todos los países. En Kuznets en el final del dualismo, en la teoría neoclásica en la separación entre el crecimiento y la distribución del ingreso, y en Piketty en la elasticidad de sustitución menor que uno.

En contraste, en las concepciones de desequilibrio la distribución se encuentra en sus manifestaciones diversas en los países. El efecto de globalización en Europa se contrarrestó por medio de las políticas fiscales de transferencia y en Corea por el cambio de la estructura

productiva. Por su parte, en América Latina no se evitó que fuera arrasada por la ineficiencia de la política fiscal de transferencias, por la estructura comercial y por sectores altamente intensivos en mano de obra. En cierta forma, se confirma que la distribución del ingreso es determinada en un sistema de más ecuaciones que variables, y que los resultados de la política distributiva varían con las características y las instituciones de los países.

El libro encuentra las causas de la distribución del ingreso y las soluciones. Las causas están en las deficiencias estructurales, en tanto que las soluciones están en la política fiscal de transferencia, el cambio en la estructura productiva, la elevación del ahorro y el capital, y las políticas macroeconómicas y laborales. Así, la economía avanza en la distribución del ingreso, al tiempo que incrementa el crecimiento económico y aumenta la participación del trabajo en el producto interno bruto (PIB). Se configura un sistema de más instrumentos que propósitos, y su combinación adecuada permite mejorar la distribución del ingreso.

Política fiscal

La inequidad del mercado se ha justificado aduciendo que puede contrarrestarse en los resultados con la política fiscal de transferencias. La presunción se ve seriamente afectada por las instituciones de libre mercado.

La ineffectividad de la política social se ha acentuado con el traslado de la administración al sector privado. En salud, educación y seguridad social, los ingresos de los servicios se realizan mucho antes que los gastos. La diferencia es una renta que varía con las características institucionales. En el caso de las pensiones, el sistema de prima media la traslada a los afiliados; en el sistema privado la capta el sector privado, que se la apropia o transfiere a los usuarios en forma creciente a los ingresos. En salud sucede algo similar. Por la misma naturaleza piramidal, genera una competencia desigual. Las instituciones que tienen altos ingresos de afiliados generan ganancias que compensan la diferencia entre los costos y las cotizaciones de los afiliados con las deudas con los hospitales que nunca se redimen. La ganancia piramidal se oculta en los balances con deudas que nunca se pagan. Pero no todos lo pueden hacer. Las empresas con bajos ingresos de afiliados quedan expuestas a pérdidas que las llevan a intervenciones que obligan a compartir las pérdidas con el Estado.

En general, las clínicas y hospitales no incurren en las inversiones para afrontar las calamidades de bajo riesgo.

En fin, la política social con subsidios de demanda ha conducido a organizaciones que se apropian de los recursos y generan rentas que son captadas por los grupos de mayores ingresos. Si a esto se agrega la baja progresividad de la tributación, se configura un gasto que tiene características similares a los ingresos personales. El coeficiente de Gini es igual antes y después de impuestos.

Separación entre producción y equidad

En las concepciones de Ricardo y Marx, se consideraba que la inequidad se originaba en la escasez. Los factores de tierra o capital dan lugar a alzas de precios que favorecen a los dueños. En este sentido, la desigualdad es un fenómeno de escasez que genera ajustes de mercado que tienden a resquebrajar el sistema. Así lo reconoce el mismo Marx cuando postula que la alta rentabilidad del capital conduce a su destrucción. En el momento en que la tasa de ganancia llegue a cero, nadie estará dispuesto a invertir y el sistema colapsará. En la práctica, no ocurrió de esa manera porque los capitalistas y los gobiernos tienen poderes para mantener la rentabilidad por encima del crecimiento.

Pese a los aportes de Ricardo y Marx, predominó la concepción que tiende a separar la inequidad del conjunto de la economía y atribuirla a fenómenos desconocidos. El extremo estuvo en Kuznets, que consideraba que luego del desarrollo urbanístico de desconexión entre el campo y la ciudad, y el predominio de la agricultura, se podía esperar el surgimiento de un sector urbano que operaría dentro de las reglas del equilibrio, que tienden a predominar sobre las de la equidad. Más aún, en la teoría clásica del crecimiento y la asignación de recursos, en que el producto y los factores crecen al mismo ritmo y se pagan de acuerdo con su productividad dentro de un sistema de igual número de ecuaciones que variables. Los dos propósitos son independientes. No hay ninguna base científica para sostener que el crecimiento económico y la distribución están relacionados.

El desconocimiento del conflicto entre el crecimiento y la distribución justificó las políticas de crecimiento inequitativas. Más concretamente, políticas de crecimiento que desconocen los efectos negativos del mercado sobre la equidad. Tal fue el caso de la globa-

lización, que se adoptó sin diagnóstico y sin tener en consideración sus repercusiones sobre la equidad. En particular, no se contempló que, en un mundo que limita la colocación de los bienes de ventaja comparativa, el comercio internacional baja el salario y amplía la brecha entre los países desarrollados y en desarrollo.

Infelizmente, el supuesto de la separación entre la producción y la equidad no ha podido erradicarse de la teoría. Piketty, luego de la crítica de Kuznets, cae en el mismo error al atribuir la distribución del ingreso a la elasticidad mayor que uno, que es un fenómeno incierto y de difícil verificación. Como lo repite insistentemente Piketty, el deterioro de la distribución del ingreso es independiente del funcionamiento del sistema. El crecimiento económico y la producción no afectan la distribución del ingreso y viceversa.

Nada de esto se confirma en los hechos. El capital crece más rápido que el producto, el retorno del capital supera al crecimiento económico y el salario se coloca por debajo de la productividad. Los resultados controvierten el postulado de Kaldor que establece que la participación del producto del capital se mantiene constante. En los últimos años, en la mayoría de los países se ha presentado una caída notable de la participación del trabajo en el PIB.

De todas formas, la presunción de Kuznets tuvo una gran acogida en los organismos internacionales y en los centros académicos. Surgió la concepción teórica neoclásica de que el mercado conduce a la solución más eficiente y es independiente de la distribución del ingreso.

El principio neoclásico se volvió parte de la teoría aceptada y tuvo una enorme influencia práctica. Surgió la creencia de que el efecto de crecimiento predomina sobre la equidad. La producción adquirió una abierta prioridad, sin mayor sustento científico.

El desconocimiento del conflicto entre el crecimiento y la distribución justificó las políticas de crecimiento inequitativas. Más concretamente, políticas de crecimiento que desconocen los efectos negativos del mercado sobre la equidad.

La ciencia económica exageró el supuesto de la separación de la producción y la equidad. Dio por sentado que el crecimiento impulsado por el mercado no afecta mayormente la equidad, sin base empírica y teórica. En este sentido, la implantación del mercado neoliberal constituyó un grave error histórico. No había base para esperar que las liberaciones y privatizaciones no afectaran la distribución del ingreso, cuando se sabe que, en condiciones de segundo mejor, que no corresponde al estado de Pareto, no es clara la relación entre los dos propósitos. Lo mejor que se podía hacer era mantener la duda. Piketty, al afirmar que la distribución del ingreso depende de la elasticidad de sustitución mayor que uno, que es un concepto indefinido de difícil comprensión y verificación, y lo peor, falso, está suponiendo que el mercado y el funcionamiento de la economía no tienen ninguna influencia en la equidad.

El orden económico internacional se montó sobre la base de que el crecimiento no afecta mayormente la distribución del ingreso, y en caso de que lo hiciera, se podría contrarrestar con una política fiscal que no afectara el crecimiento. Sobre esta premisa se justificaron la globalización y la liberación del mercado de todas las economías.

Las cosas resultaron mal. El crecimiento económico deterioró la distribución del ingreso. La política fiscal no logró compensarlo por la vía del mercado, y más bien redujo el crecimiento. La explicación es simple. En condiciones de distorsiones, los desperfectos del sistema se observan en el crecimiento anárquico de los factores y de sus rentabilidades con respecto a los precios. El sistema evoluciona dentro de un desorden en el que ganan los que tienen mayor acceso a los factores escasos y medios para apropiarse de las rentas. En el proceso, el capital aparece como el factor más escaso y el empleo, como el más abundante.

El dilema entre el crecimiento y la equidad se esclarece en las nuevas teorías del crecimiento y la distribución del ingreso. La principal causa de la distribución del ingreso es el conflicto con el crecimiento. El crecimiento deteriora la distribución del ingreso y las acciones para compensarla deterioran el crecimiento. Hay más ecuaciones que variables. La conciliación de los dos propósitos no es posible sin un cambio en la economía que reduzca las distorsiones, como por ejemplo el escaso ahorro de los ingresos del capital, la discrepancia entre el ingreso nacional y el gasto, el

balance externo entre importaciones y exportaciones, el bajo salario con respecto a la productividad, el predominio de los recursos naturales, el elevado desempleo y la exclusión de la industria. Así las cosas, la economía iría acompañada de una mejor distribución del ingreso. Mal puede esperarse que el modelo sea igual para todos los países. Lo que se requiere es una teoría que contemple las diferencias regionales.

El drama de las imperfecciones del mercado y las deficiencias estructurales de las economías es que los estímulos de mercado para superarlos aumentan la producción y deterioran la distribución del ingreso. En este contexto, los estímulos de mercado para elevar el crecimiento deterioran la distribución del ingreso. Para completar, las políticas fiscales para reducir las desigualdades de los ingresos individuales contraen el crecimiento económico y están expuestas a círculos viciosos que amplían las desigualdades e impiden el máximo crecimiento. No obstante, la tradición de siglos gira en torno a la separación entre el crecimiento y la equidad. El mercado conduce al máximo crecimiento y no afecta mayormente la distribución del ingreso. La modernización, luego de un nivel de ingreso per cápita inferior al de Colombia, logra un crecimiento de la producción y el empleo igual a su potencial. El problema del desarrollo se traduce en crear un ambiente de liberación para que el mercado pueda operar a sus anchas. El crecimiento económico evoluciona a sus anchas y la distribución del ingreso desmejora.

El diagnóstico fracasó en los últimos 30 años. La globalización y la liberación de los mercados dieron lugar a una aceleración del crecimiento que ocultó los efectos de la equidad. Posteriormente, la moderación del crecimiento y la ampliación de las desigualdades ocasionaron protestas sociales que se buscaron calmar con la aplicación del gasto público, que rebajó el ahorro y acentuó la caída del crecimiento. Las economías entraron en un estado de crecimiento declinante y ampliación de las desigualdades que llevan al descontento de las mayorías que no pueden contenerse dentro del marco de la democracia.

Deficiencias estructurales y mercado

Las economías no operan en estado de equilibrio. La conciliación de los dos propósitos está condicionada a una intervención del Estado, orientada a moderar las



distorsiones. En la práctica, se alcanza con una amplia acción en el ahorro, el comercio internacional, la coordinación monetaria y fiscal y la sustitución de los recursos naturales por la industria. En el fondo, la recomendación se inclina en favor de Ricardo y sobre todo de Marx, que proclamaban que la causa de la inequidad y la escasez es el crecimiento del capital, que mantiene el retorno del capital por encima del crecimiento y del producto, y el salario por debajo de la productividad. La solución sólo se puede evitar con una presencia abierta del Estado para poner el retorno del capital en su lugar.

Es necesario emplear los poderes del Estado para cerrar la brecha entre el retorno del capital y el crecimiento, y alinear el salario con la productividad. Lo primero se puede hacer con un impuesto y lo segundo con un subsidio a las empresas que aumente la nómina del trabajador por encima de la tendencia histórica.

Piketty cae en la tendencia neoclásica de Kuznets de buscar la inequidad en comportamientos estilizados que se producen en todos los lugares, como la elasticidad de sustitución mayor que uno. Si esto fuera cierto, el resultado se daría en todos los lugares y en todos los tiempos, y hemos visto que no se presenta en Europa ni en los países asiáticos. Por exclusión de materia, se cumple nuestra hipótesis de que la distribución del ingreso está en un abierto conflicto con el crecimiento determinado por un sistema de más ecuaciones que variables y, en términos concretos, depende de las características de las economías. La causa se origina en los fundamentos científicos que varían con las condiciones propias de las economías, y no se presentan en la misma forma en todos los lugares. En Europa se compensó con la política fiscal de transferencias y en los tigres asiáticos por el cambio de la estructura económica. La gran damnificada fue América Latina, donde se enfrentó dentro de la más pura concepción del libre mercado. Algo similar ocurrió en Estados Unidos, pero en menor grado.

En las concepciones de equilibrio, las soluciones se buscan con comparaciones estilizadas que se dan en todos los lugares y se justifican con cifras agregadas y universales que desconocen las características de los países. Las relaciones se justifican con variables exógenas que se cumplen en periodos y condiciones especiales. Kuznets las justifica por la normalización de las economías después del estructuralismo. La teoría neoclásica, con Solow a la cabeza, por la separación entre el crecimiento y la distribución del ingreso, que sólo se da en condiciones hipotéticas de equilibrio general, y más concretamente en los modelos de crecimiento dominantes que han sido controvertidos por los hechos. Piketty las valida con el supuesto de elasticidad de sustitución mayor que uno, que es controvertida por la mayoría de los estudios globales y particulares de los países. La hipótesis no se cumple en la información agregada de los países, y menos en la individual.

Nuestro enfoque, por el contrario, busca el conflicto en los fundamentos estructurales dictados por la ciencia económica elaborada y perfeccionada a lo largo de la obra. En efecto, se origina en el conflicto entre la distribución y el crecimiento, ocasionado por las imperfecciones del mercado y las deficiencias estructurales.

De ningún modo se trata de un problema de cifras. Nadie está diciendo que los efectos de la distribución del ingreso sean nítidos y que se den por igual en todos los países. Debido a la fuerte relación de la distribución del ingreso y las economías, las alteraciones de la distribución se manifiestan de distinta manera. Lo esencial es la teoría de la distribución del ingreso, más concretamente, que se entiendan sus fundamentos científicos y que se confronten con la realidad. Así, la política fiscal mejora la equidad y reduce el crecimiento económico. La estructura de la producción comercial y sectorial mejora la distribución y eleva el crecimiento. El mercado mejora la distribución y empeora el crecimiento. Ahora,

En los casos descritos de los mercados se observa que las deficiencias estructurales generan estímulos que aumentan la producción a cambio de favorecer a los sectores de mayores ingresos y lesionar a los de menores ingresos.

el desafío está en convertir estas relaciones en instrumentos que mejoren la distribución y el crecimiento. Lo que cuenta al final es la transformación de los fundamentos científicos en instituciones e instrumentos que redunden en una mejoría de la distribución del ingreso y en la elevación del crecimiento.

En condiciones de equilibrio de igual número de variables y ecuaciones, el crecimiento económico es neutral. Las alteraciones de la economía generan fuerzas que la regresan a la posición inicial. Las cosas son muy distintas en condiciones de desequilibrio de más variables que ecuaciones causadas por la presencia de imperfecciones de mercado y de eficiencias estructurales.

El crecimiento económico y la distribución del ingreso están en abierto conflicto. Las dos variables son relacionadas por múltiples ecuaciones y se desconoce cuál es la mejor opción. Las fuerzas del mercado conducen a un estado desconocido. El desorden se asemeja al ocasionado por la segunda ley de la termodinámica, que predice que la energía va del calor al frío, y la ley del movimiento espacial, que establece que los cuerpos son atraídos por las masas. En economía, adquiere la forma de que el mercado y la competencia buscan el camino más fácil en la mejoría de las condiciones de los ricos con respecto a los pobres.

En los casos descritos de los mercados se observa que las deficiencias estructurales generan estímulos que aumentan la producción a cambio de favorecer a los sectores de mayores ingresos y lesionar a los de menores ingresos. El comportamiento se observa claramente en el crecimiento, el balance entre el ahorro y la inversión, las discrepancias sectoriales entre oferta y demanda, la balanza de pagos, las prácticas monopólicas y el mercado laboral. En todas ellas, las deficiencias estructurales reducen el salario y elevan el retorno de capital.

Conciliación

La versión de Harrod-Domar y Solow en equilibrio es representada por la ecuación antes descrita y da lugar al primer conflicto entre los dos propósitos. Se regresa al dilema del siglo XX entre el crecimiento determinado por el capital o la tecnología. El capital no puede explicar el crecimiento porque su participación en el producto es baja. El avance tecnológico tampoco lo explica porque el crecimiento de la tecnología es declinante. La influencia de los dos factores sólo se puede dar en situaciones de desequilibrio.

En las teorías de crecimiento dominantes se establece que las economías tienden a un equilibrio en que el capital, el producto y el empleo crecen al mismo ritmo. Además, los factores se pagan igual que la productividad. La evidencia de todas las economías muestra que la relación capital-producto crece, que la participación del trabajo en el producto disminuye, que la tasa de interés se coloca por encima de la productividad del capital, el salario por debajo de la productividad del trabajo y las empresas obtienen altos poderes monopólicos para fijar precios por encima de los costos.

Piketty atribuye el aumento de la participación del capital en el producto a la elasticidad de sustitución mayor que uno. La verdadera explicación está en el cumplimiento de las condiciones de equilibrio competitivo. En tales condiciones, la relación capital-producto sube, la productividad del capital se coloca por encima del crecimiento del producto, el salario se coloca por debajo de la productividad y las empresas colocan los precios por encima de los costos marginales.

La síntesis es diáfana. Como lo confirma la evidencia histórica, ambos factores están presentes. El efecto del capital no desaparece y se puede mantener con un aumento de la tasa de ahorro y la relación capital-producto. Por su parte, el efecto de la tecnología existe, pero tiende a disminuir con el tiempo. El resultado neoclásico –con Solow a la cabeza– de que el crecimiento económico es determinado exclusivamente por la innovación tecnológica no pasa de ser una fantasía.

Para completar, las imperfecciones del mercado y las deficiencias estructurales amplían las restricciones; en términos más técnicos, las ecuaciones. Los principales componentes del sistema económico operan en desequilibrio. El ingreso nacional supera el gasto, el ahorro es inelástico a la tasa de interés, las actividades de ventaja comparativa son limitadas por la demanda,

el desempleo se manifiesta en salarios positivos, y las ofertas y las demandas no se igualan en todos los mercados. El crecimiento es determinado por los principales componentes de la economía.

La hipótesis es confirmada por la experiencia mundial de la globalización. La amplitud del mercado hacia más equilibrio varió enormemente con las características de las economías. En Europa se contrarrestó con la política fiscal de transferencias y en Corea con el cambio de la estructura productiva. En contraste, en América Latina se vio agravado por las deficiencias estructurales y la ineficacia de las políticas sociales públicas.

Estas evidencias dejan sin piso las concepciones de Kuznets, Piketty y los neoclásicos, que atribuyen la distribución a comportamientos estilizados que se dan por igual en todos los lugares. Tan cierto es esto, que las propuestas no van más allá de ampliar la tributación y elevar el gasto en educación; por eso resultaron insuficientes y, es más, efímeras.

La solución es más compleja. Se requiere una amplia intervención del Estado en un marco de igual o más instrumentos ideado por Tinbergen a mediados del siglo pasado, que se cumple en todas las disciplinas.

No se podía esperar que un fenómeno determinado en los países por un sistema de más ecuaciones que variables se pudiera resolver con medidas generalistas, dictadas desde los centros de pensamiento externos. Como se vio en la globalización, los efectos de las regiones varían en forma astronómica con las características propias de los países. En el fondo, el mejor desempeño de los países asiáticos reside en que sus determinaciones, por razones desconocidas, están más cerca de nuestra teoría.

El gran drama está en que los organismos internacionales operan alrededor del modelo de equilibrio competitivo, que supone que el mercado conduce al máximo crecimiento y que éste es independiente de la distribución del ingreso. En el libro se avanza para mostrar cómo los instrumentos de política, la intervención del Estado, afecta los dos objetivos. En efecto, la elevación del ahorro del capital mejora la distribución y eleva el crecimiento, el cambio en la estructura de comercio internacional mejora la distribución del ingreso y eleva el crecimiento, la política fiscal mejora la distribución del ingreso y reduce el crecimiento, y la intervención en el mercado laboral eleva el crecimiento y mejora la distribución.

En el capítulo anterior se vio que el crecimiento económico es determinado por un sistema de más ecuaciones que variables. Ahora se advierte que en condiciones de imperfecciones del mercado y deficiencias estructurales la distribución del ingreso es determinada por variables similares. De allí se deduce que los dos objetivos están relacionados con un sistema de más ecuaciones que variables. En condiciones de libre mercado están en abierto conflicto. La conciliación está condicionada a una abierta intervención del Estado dentro del marco de igual número —o más— de instrumentos que variables. El resultado controvierte la concepción tradicional que considera que la distribución del ingreso es un fenómeno exógeno incierto de las economías, que se presenta en forma similar en todos los países y se representa en términos estilizados. Así, Piketty lo atribuye a la elasticidad de sustitución, Kuznets al dualismo y los neoclásicos a factores desconocidos, externos a las economías.

En la teoría neoclásica, se presume que la distribución del ingreso es independiente de las economías. La experiencia de la globalización revela algo muy distinto. La influencia varió notablemente con las características de los países. En Europa se evitó con la política fiscal y en Corea con el cambio de la estructura externa. En contraste, en Colombia se vio acentuada por la ineficacia de la política económica adoptada.

El desconocimiento del conflicto condujo a modelos de crecimiento inequitativos. El mercado busca el camino más fácil, como la energía. En un mundo de deficiencias estructurales, tiende a trasladarles los costos a los más débiles. La ilustración más clara está en el ahorro. La inelasticidad del ahorro a la tasa de interés impide que el capital crezca igual que el producto, coloca los retornos del capital por encima del crecimiento económico y reduce el salario. Lo mismo sucede con las

En la teoría neoclásica, se presume que la distribución del ingreso es independiente de las economías. La experiencia de la globalización revela algo muy distinto. La influencia varió notablemente con las características de los países.

limitaciones a las ventajas comparativas en el comercio internacional. El mercado coloca el salario por debajo de la productividad de los bienes de ventaja comparativa. Algo similar ocurre en el balance macroeconómico y el empleo. Es claro que en un mundo de distorsiones económicas el mercado tiende a ampliar la diferencia de ingresos; en particular, reduce el salario y eleva la productividad del capital.

En la teoría neoclásica se supone que las economías tienden a un estado de máxima producción e independencia entre la producción y la equidad. La neutralidad se consigue con el predominio de la tecnología en el crecimiento, cuando la evidencia empírica muestra que tanto el capital como la tecnología contribuyen al crecimiento. El capital es la principal fuente de crecimiento y deteriora la distribución del ingreso. La conciliación sólo se puede lograr con una elevación del ahorro del capital.

La distribución del ingreso se atribuye a factores exógenos inciertos que se dan por igual en todos los países. Así, la solución global a la equidad ha sido ampliar la factura tributaria y el gasto en educación, medida que ha tenido un efecto muy inferior al previsto. Es claro que la concepción de equilibrio ha sido una limitación para entender las causas estructurales de la distribución del ingreso y su relación con la producción y la economía. La distribución del ingreso se atribuye a razones desconocidas, que no tienen relación con el crecimiento económico. Los correctivos actúan sobre los resultados, reduciendo el ahorro y elevando las transferencias a los sectores menos favorecidos. El resultado es una reducción del ahorro, el incremento del déficit en cuenta corriente y el aumento del desempleo, que deterioran el crecimiento y tornan la economía inviable.

La alternativa es la abierta intervención del Estado en un marco amplio de igual o más instrumentos para mejorar la distribución del ingreso y sostener el crecimiento. De hecho, se plantean planes indicativos, orientados a mejorar la distribución dentro del orden establecido. De ninguna manera, la solución a la equidad son la destrucción de la economía y el crecimiento económico para elevar las condiciones de los pobres. Lo que importa es que los pobres ganen tanto en la distribución como en el crecimiento, en un marco preconcebido y viable.

La experiencia de la globalización revela que su influencia varió notablemente con las características de los países. En Europa se evitó con la política fiscal

y en Corea con el cambio en la estructura productiva. En contraste, en Colombia se vio intensificada por las deficiencias de la política económica y de la estructura de producción, en particular la del comercio internacional.

El verdadero aporte de la obra es que encontró las causas estructurales de la distribución del ingreso en las imperfecciones del mercado y las deficiencias estructurales de la economía. No menos significativo ha sido el avance en precisar la naturaleza de la intervención del Estado para conciliar el crecimiento y la distribución del ingreso. Lo cierto es que el mundo tiene los elementos centrales para configurar sociedades dinámicas y equitativas.

La nueva teoría de la distribución

La distribución del ingreso se inspiró dentro de la concepción de equilibrio competitivo. Las economías evolucionan dentro de un estado de igualdad entre las ofertas y demandas en todos los mercados. Por exclusión de materia, la distribución proviene de factores externos a la economía. La distribución del ingreso y la producción son independientes.

Este diagnóstico dominó el pensamiento económico aceptado. Se creía que la distribución del ingreso venía de afuera, independiente de las características propias de las economías. A la luz de esta visión, se abrió camino el crecimiento con secuelas desconocidas sobre la distribución del ingreso. Luego de varias décadas, se encuentra que el mercado deteriora la distribución del ingreso.

La realidad esclarecida a lo largo del libro revela algo muy distinto. El crecimiento es determinado dentro de un marco de desequilibrio de más ecuaciones que variables. Ciertamente, tiene efectos inciertos sobre la distribución del ingreso, y en el caso de las deficiencias económicas encontradas a lo largo de la obra, la deteriora. La conciliación de los dos propósitos está condicionada a que el Estado armonice los instrumentos con los objetivos. En términos generales, se plantea la necesidad de un modelo de crecimiento con equidad.

La distribución del ingreso se origina, en buena medida, en la presunción de que las economías operan en equilibrio tanto en la asignación de recursos como en las relaciones intergeneracionales. La distribución del ingreso proviene de factores indefinidos que se presentan en forma similar en todos los lugares y se pueden corregir con medidas globales, como aumentar la tributación e

incrementar el gasto en educación, que se aplicaron en los últimos 30 años con resultados efímeros.

La falencia tradicional de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y los organismos internacionales reside en plantear la distribución del ingreso como un problema global, independiente de los países. El efecto de la globalización de los últimos 30 años se manifestó de diversas formas. En Europa fue contrarrestada por el estado de bienestar y en el Sureste Asiático por cambios drásticos en la estructura económica. En contraste, América Latina fue arrastrada por la ineficacia de la política fiscal y la serie de deficiencias de la organización económica.

Es claro que la concepción de equilibrio propició una política que deteriora la distribución del ingreso. Las medidas de profundización del mercado deterioran la distribución y elevan el crecimiento. En un mundo dominado por el libre mercado expuesto a deficiencias estructurales, el sistema conduce al deterioro de la distribución del ingreso. El número de ecuaciones es mayor que el número de variables. Mientras predomine el mercado, los índices tenderán a deteriorarse. Así ocurrió sin ambages en América Latina entre 1980 y 2020. El retraso de la distribución del ingreso es el resultado de acciones de los países inducidas por teorías equivocadas: el mercado conduce al máximo crecimiento y es independiente del ingreso. En todas partes, el fracaso de la teoría ocasionó resultados opuestos a los previstos. Y los esfuerzos desesperados por elevar el crecimiento dentro de las reformas de mercado, como el Consenso de Washington, deterioraron la distribución del ingreso y tienen su ilustración más contundente en América Latina. Los grandes responsables de este revés histórico son las teorías de libre mercado y los gobiernos que las aplicaron sin beneficio de inventario.

La ONU y el Foro de Davos tienen una descripción global correcta de las desigualdades. Sin duda, el mundo opera con diferencias de ingresos, en que el sufrimiento de los que tienen menos es mucho mayor que el goce de los que tienen más. La distribución del ingreso más equitativa elevaría el bienestar de la sociedad en conjunto. Sin embargo, no se ha avanzado en precisar las causas concretas de la distribución del ingreso porque se desconocen las características propias de los países. De ninguna manera es un flagelo que incide en las naciones en igual forma. La distribución del ingreso entre 1980 y 2020 no se deterioró en Europa y el Sureste Asiático,

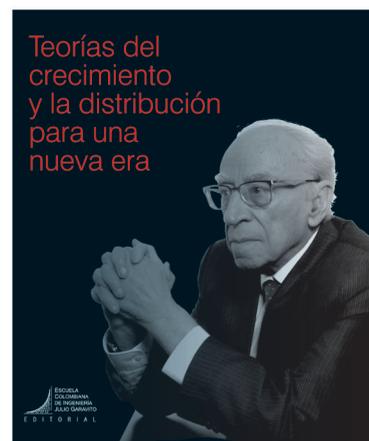
al tiempo que se presentó en forma drástica en América Latina. Las diferencias obedecen al manejo de los instrumentos de política en las tres regiones. Mientras Europa y Asia contrarrestaron los efectos negativos del mercado, América Latina no hizo mayor cosa para evitarlo.

La explicación en materia de los fundamentos científicos es más convincente. Está visto que la distribución del ingreso y el crecimiento están relacionados por sistemas de más ecuaciones que variables. Las economías de libre mercado elevan el crecimiento y deterioran la distribución del ingreso. La solución más adecuada sólo se puede lograr con la presencia del Estado para revertir la discrepancia entre variables y ecuaciones con un marco de instrumentos mayor que los propósitos. La tarea se puede realizar con políticas fiscales de transferencia, elevación del ahorro, cambio de estructura productiva y reforma laboral. El manejo del instrumental permitiría mejorar la distribución del ingreso y elevar el crecimiento.

No es exagerado afirmar que el crecimiento es un fenómeno a la deriva de muchas más ecuaciones que variables. A la discrepancia entre las ofertas y demandas por la inoperancia del mercado, habría que agregar el retorno del capital por encima del crecimiento económico, el salario por debajo de la productividad, el crecimiento del producto por encima del capital y el desempleo con salarios superiores a cero.

Tal vez una de las secuelas más graves del falso diagnóstico del equilibrio competitivo está en el avance de una teoría de la distribución del ingreso que carece de

Eduardo
Sarmiento Palacio



sustento científico para enfrentar las enormes diferencias de ingreso. La falta de una teoría adecuada del crecimiento ha inhibido el surgimiento de una concepción comprensiva de la realidad. El supuesto de equilibrio por definición oculta el surgimiento de fuerzas inequitativas que amplían la diferencia de ingreso durante siglos.

La distribución del ingreso no avanza porque no se conocen las causas de los conflictos y porque no se dispone de instrumentos para movilizarlos. De entrada, se tienen sistemas de más ecuaciones que variables. El mercado tiende a deteriorar la distribución del ingreso.

En la formulación de equilibrio de Solow, y en general de equilibrio competitivo, se encuentra que el crecimiento y la equidad son separables. La primera ilustración aparece cuando el crecimiento es determinado en forma exclusiva por el cambio tecnológico. El crecimiento es neutral, e incluso ligeramente equitativo, porque los beneficios del conocimiento recaen en buena medida en el trabajo. Lo mismo se puede decir del modelo de equilibrio competitivo, en el que las ofertas y las demandas se igualan en todos los mercados. El crecimiento económico es neutral, y no afecta explícitamente la distribución del ingreso.

Las cosas son diferentes cuando se presentan imperfecciones en el mercado y deficiencias estructurales en las áreas críticas. El comportamiento de la economía es determinado por un sistema de más ecuaciones que variables. Las acciones de los agentes impulsados por el mercado deterioran la distribución del ingreso. Los dos objetivos están en abierto conflicto.

Los modelos de crecimiento dentro de la concepción del fundamentalismo de mercado amplían las desigualdades. Así mismo, las políticas distributivas reducen el crecimiento económico. La conciliación de los dos propósitos sólo se puede lograr dentro del marco de instrumentos y objetivos ideado por Tingerben, que es aplicable a las más variadas disciplinas. Para tal efecto, es necesario acudir a los procedimientos de laboratorio que relacionan los instrumentos de política con los componentes del modelo económico. En economía, donde no hay acceso a los experimentos de las ciencias físicas y biológicas es necesario acudir a la información comparada de los países, como sería el caso de la evidencia observada durante la globalización. Allí aparece en forma clara la influencia de las políticas centrales sobre las áreas neurálgicas de la economía.

En fin, la concepción y las soluciones a la distribución del ingreso giran en torno a una visión de equilibrio de igual número de ecuaciones y variables. Se supone que en un mundo de desigualdad y confrontación entre las ofertas y las demandas, incluso en condiciones de caos, el mercado conduce al máximo crecimiento y la mejoría de la distribución del ingreso. El desorden inicial es corregido por el mercado, que convierte los beneficios individuales de los ganadores en beneficios sociales. El mercado hace el milagro. El resultado sólo se da en condiciones ideales, que no corresponden a la realidad. Las economías tienden a operar con diferencias entre las ofertas y las demandas.

La solución de un sistema de más ecuaciones que variables solamente se puede conseguir con una intervención estatal que amplíe las variables de Estado y concilie los conflictos con un marco de más instrumentos que variables. El procedimiento se fortalece con una amplia información comparada, que relacione los instrumentos con los coeficientes de Gini y el crecimiento del producto. Así, la política fiscal mejora la distribución del ingreso y reduce el crecimiento, el cambio de la estructura comercial mejora la distribución del ingreso y aumenta el crecimiento, la elevación del ahorro mejora la distribución y eleva el crecimiento, y la política laboral de igualación de salarios con la productividad mejora la distribución del ingreso y aumenta el crecimiento. No es una ficción. Corea logró la conciliación con el cambio de la estructura de producción y Europa la consiguió con la política de transferencias fiscales, es decir, con el estado de bienestar. Por su parte, América Latina no ha logrado mayor avance por la ineficacia tanto de la política fiscal como de la estructura productiva.

El principal aporte de la investigación está en un sistema determinado a todos los niveles por un mayor número de ecuaciones que de variables. El error de los pensadores económicos residió en que trataron de subsanar la diferencia con supuestos arbitrarios que deforman la realidad. Por ejemplo, Arrow-Debreu para demostrar la existencia del equilibrio suponen que el precio de los bienes con exceso de oferta es igual a cero, lo que no se presenta en ningún lugar del mundo. Solow y Piketty suponen elasticidad de sustitución entre capital y trabajo mayor que uno. Heckscher-Ohlin-Samuelson suponen que los países se especializan en los bienes de ventaja comparativa.

La mejoría en la distribución del ingreso con crecimiento sólo se puede lograr con la ampliación de las variables de Estado que subsanen las diferencias entre variables y ecuaciones. La conciliación es posible dentro del marco de la planeación indicativa de más instrumentos que variables. En efecto, el cambio de la estructura productiva y la política laboral elevan el crecimiento económico y mejoran la distribución del ingreso, la política fiscal de transferencias mejora la distribución del ingreso y reduce el crecimiento, y el aumento del ahorro incrementa el crecimiento y tiene un impacto incierto sobre la distribución del ingreso. El manejo estratégico y coordinado de este instrumental cumple las condiciones necesarias para reducir las desigualdades y elevar el crecimiento.

REFERENCIAS

- Arrow, K. & Debreu, G. (1954). Existence of an equilibrium for a competitive economy. *Econometrica*, 22-3.
- Barro, R. & Sala-i-Martin, X. (1995). *Economic growth*. Nueva York: McGraw Hill.
- Boushey, H., DeLong, B. & Steinbaum, M. (eds.) (2017). *After Piketty. The agenda for economics and inequality*. Cambridge: Harvard University Press.
- Domar, E. D. (1946). Capital expansion, rate of growth and employment. *Econometrica*, 14-2.
- Gordon, R. (2016). *The rise and fall of American growth*. Princeton: Princeton University.
- Harrod, R. F. (1939). An essay in dynamic theory. *The Economic Journal*, 49-193.
- Kuznets, S. (1955). Economics growth and income inequality. *American Economic Review*, 45-1.
- Lucas, R. (2002). *Lectures of economic growth*. Cambridge: Harvard University Press.
- Piketty, T. (2014). *Capital in the twenty-first century*. Cambridge: Harvard University Press.
- Sarmiento, E. (2014). *Distribución del ingreso con crecimiento es posible*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sarmiento, E. (2020). *Teorías del crecimiento y la distribución para una nueva era*. Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Solow, R. (2014). Thomas Piketty is right. *La Gaceta*, 523.
- Young, A. (1928). Increasing returns and economic progress. *The Economic Journal*, 38-152.

Remoción de manganeso en la planta de tratamiento de agua potable de Tocancipá (Cundinamarca)

Manganese removal at Tocancipá's (Cundinamarca) drinking water treatment plant

DIANA ISOLINA BARRERA MARTÍNEZ¹ - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.

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

diana.barrera@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/09/2019 Aceptado: 30/09/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En el proyecto de investigación se evalúa la remoción de manganeso en el sistema de tratamiento convencional de agua potable del municipio de Tocancipá, ya que este elemento químico ha generado dificultad para ser removido y cumplir permanentemente con el valor máximo permisible, de conformidad con la Resolución 2115 de 2007, que es de 0,1 mg Mn/L; se analizaron las condiciones actuales de tratamiento del sistema, considerando las características del agua cruda y del agua tratada, y se evaluó el proceso de oxidación del manganeso con peróxido de hidrógeno, que es el método utilizado actualmente.

Palabras claves: remoción de manganeso, oxidación, peróxido de hidrógeno, sistema de tratamiento de agua potable, pH, alcalinidad.

Abstrac

The research project evaluates the removal of manganese in a conventional drinking water treatment Plant of the municipality of Tocancipá, since this chemical element has proven difficult to be removed and is permanently kept under the maximum permissible value in accordance with resolution 2115 of 2007, which is 0.1 mg Mn/L; several analysis of the current treatment conditions of the system were analyzed, including the characteristics of raw water, treated water, and finally assessed the oxidation process of manganese with hydrogen peroxide, the currently used method.

Keywords: manganese removal, oxidation, hydrogen peroxide, drinking water treatment system, pH, alkalinity.

INTRODUCCIÓN

Entre los usos que se le da al agua del río Bogotá, se encuentra el de consumo humano y doméstico en sectores urbanos; por esta razón, el municipio de Tocancipá cuenta con concesión de aguas y posterior sistema convencional de potabilización para abastecer aproximadamente a 11.000 habitantes de sus zonas rural y urbana, que presentan tasas de crecimiento elevadas, debido principalmente al fenómeno de inmigración de personas de todas partes del país, generado por la expectativa de empleo que genera el crecimiento del sector industrial ubicado en el municipio. Por lo anterior, es de suma importancia garantizar el tratamiento y la oferta de agua potable para la creciente demanda de la zona de estudio.

El manganeso es uno de los elementos químicos que han generado problemas en la planta de potabilización del municipio de Tocancipá, denominada Los Patos, por la dificultad para ser removido por un sistema convencional de purificación. Los valores promedio de la concentración del manganeso en el río Bogotá están entre 0,05 y 0,5 mg/L y el valor máximo permisible, de conformidad con la Resolución 2115 de 2007, es de 0,1 mg Mn/L.

Dentro del estudio se realizó la toma de muestras para determinar las concentraciones de manganeso, utilizando el protocolo 3500-Mn del Standard Methods, en época de verano y época de lluvia, del agua cruda afluente de la planta de purificación, en el afluente del proceso de coagulación y filtración, así como del efluente de la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Tocancipá.

RESULTADOS

Las características de la fuente de abastecimiento del río Bogotá son muy vulnerables al cambio por las características dinámicas de la cuenca, puesto que aguas arriba de la bocatoma se declararon zonas industriales, y se encuentran las descargas de aguas residuales de los municipios de Gachancipá, Suesca,

Chocontá y Villapinzón; adicionalmente el río, en su cuenca alta, recibe las descargas de las curtiembres, lo que hace que sea una fuente muy difícil de tratar y que requiera un constante monitoreo para evaluar el proceso de tratamiento.

Los puntos definidos para la toma de muestras fueron la bocatoma del sistema (agua cruda), efluente del sedimentador (agua clarificada), efluente de los filtros (agua filtrada) y efluente del sistema de potabilización (agua tratada).

Turbiedad

Tabla 1

Promedio mensual de turbiedad en los cuatro puntos de muestreo

Turbiedad (UNT)				
Mes	Agua cruda	Agua clarificada	Agua filtrada	Agua tratada
Enero	17,4	3	0,8	1,4
Febrero	22,8	12,5	4,8	2,4
Marzo	34,3	4	0,9	1
Abril	46,2	11,2	2,1	1,6
Mayo	29,8	8,2	2,3	1,9
Junio	22,1	5,8	1,4	2
Julio	16,9	4,3	1,2	1,7
Agosto	17,2	6	0,6	1,8
Septiembre	18,7	4,3	1,1	1,1
Octubre	20	11,4	4	2
Noviembre	13,5	4	1	1,6
Diciembre	10	2,5	0,8	1,1

Los datos presentados en la tabla anterior se grafican a continuación:

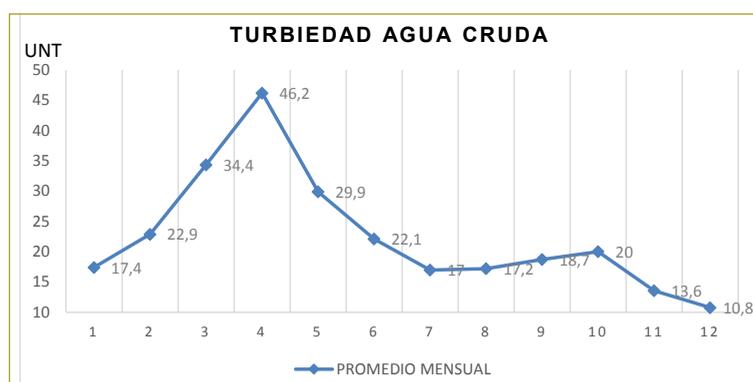


Figura 1. Datos de turbiedad del agua cruda.

En la figura anterior se puede apreciar un aumento en el valor promedio mensual de la turbiedad en los meses de marzo y abril, lo cual coincide con el incremento histórico de las precipitaciones en el municipio y en la cuenca alta del río Bogotá, que se da en estos meses de valores promedio de precipitación con datos históricos desde 1998, tomados de la estación 21205850 El Colombiano, perteneciente al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), ubicada en el municipio de Sesquilé y la más cercana al municipio de Tocancipá. La turbiedad del agua cruda varía en un promedio mensual de 10 a 46 UNT.

Así mismo, los valores promedios de turbiedad del agua clarificada fluctúan entre 2,5 y 12,5 UNT, debido a las variaciones de la calidad de agua de la fuente, los

efectos de la coagulación y la floculación. Sin embargo, en todos los meses se observa remoción a valores inferiores de 12,5 UNT (figura 2).

En el punto de muestreo 3 (efluente de filtros) se puede ver que los valores más altos de turbiedad en esta fase del tratamiento se presentan en los meses de febrero y octubre, que corresponden a los valores máximos del agua clarificada (figura 3).

Por otra parte, se registran los valores de turbiedad promedio mensual del agua tratada. Se observa que el sistema tiene un alto porcentaje de remoción de turbiedad y que el agua tratada cumple con el valor máximo permisible para agua potable de 2 UNT, excepto durante el mes de febrero (figura 4).

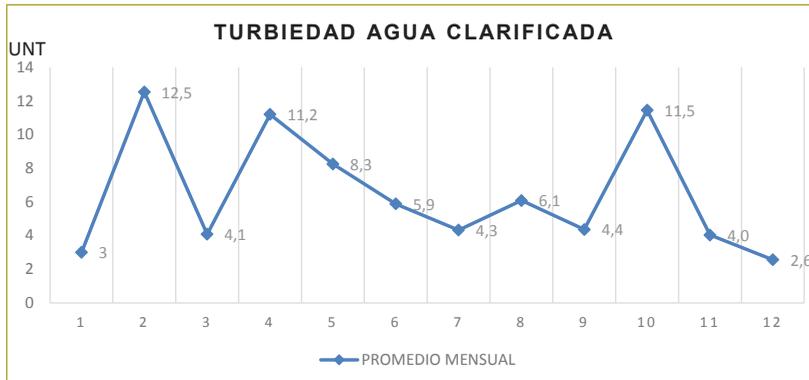


Figura 2. Datos de turbiedad en el efluente del sedimentador.

Figura 3. Datos de turbiedad en el efluente de los filtros.

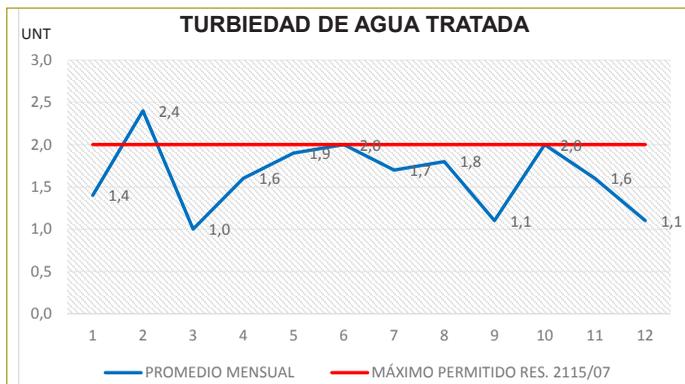
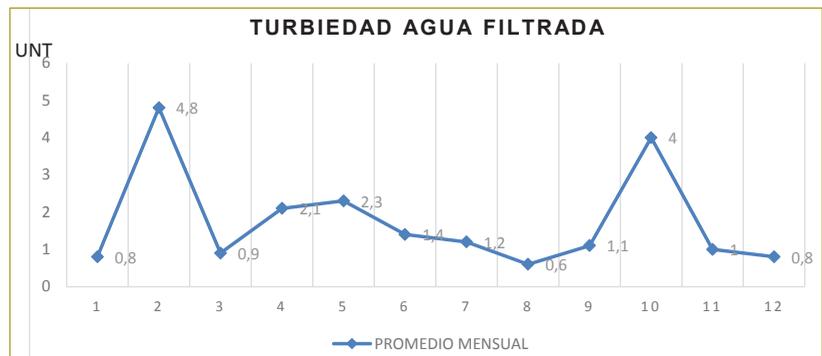


Figura 4. Datos de turbiedad en el efluente de la planta de tratamiento.

pH

Tabla 2
Valores promedio mensuales de pH en los cuatro puntos de muestreo

Mes	pH			
	pH agua cruda	pH agua clarificada	pH agua filtrada	pH agua tratada
1	7,3	7,2	7,1	6,9
2	6,8	6,8	6,8	6,8
3	7,0	7,0	7,0	6,8
4	7,0	6,8	6,8	6,8
5	7,4	7,1	7,1	6,9
6	7,1	6,7	6,7	6,7
7	7,3	6,5	6,6	6,7
8	7,1	6,9	6,9	6,8
9	7,5	7,4	7,4	7,2
10	7,3	7,2	7,2	7,1
11	7,3	7,2	7,2	7,1
12	7,2	7,2	7,2	7,0

Figura 6. Valores de pH en el efluente del sedimentador.

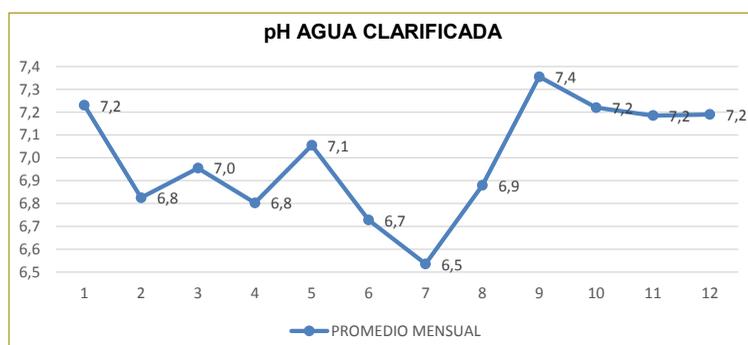
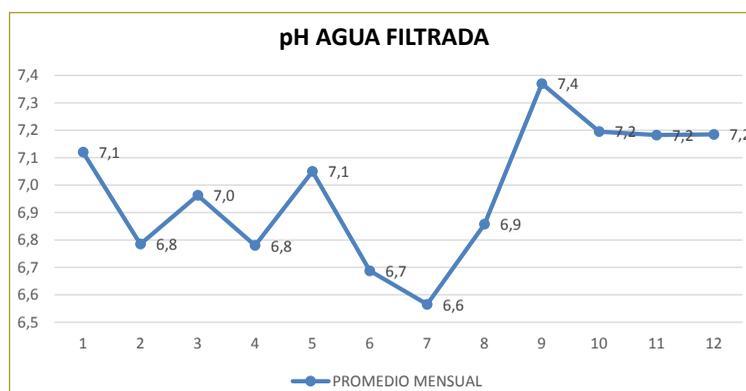


Figura 7. Valores de pH en el agua filtrada.



Como se puede ver (tabla 2), los valores de pH varían en un rango de 6,5 a 7,5 unidades en los cuatro puntos de monitoreo, y cumplen con el rango para agua potable de 6,5 a 9,0, establecido en el artículo 4 de la Resolución 2115 de 2007.

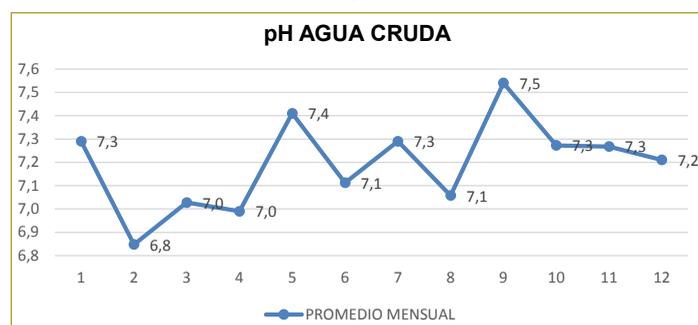
Igualmente, el pH de la fuente de abastecimiento oscila entre 6,8 y 7,5 (figura 5).

En el agua clarificada el pH varía entre 6,5 y 7,4, lo que refleja el efecto de la coagulación (figura 6).

En el agua filtrada se mantiene el rango de pH del agua clarificada de 6,5 a 7,4, que cumple con los rangos de valores aptos para consumo humano (figura 7).

Así mismo, los valores de pH del agua tratada, tomados en el punto 4 de muestreo, oscilan entre 6,7 y 7,2, que cumplen con el rango establecido para agua potable por la normativa colombiana (figura 8).

Figura 5. Valores de pH en el afluente de la planta de tratamiento.



Alcalinidad

Tabla 3
Valores de alcalinidad promedio mensual en los cuatro puntos de muestreo

Alcalinidad total (mg/l - CaCO ₃)			
Mes	Agua cruda	Agua clarificada	Agua tratada
1	12,5	12,5	9
2	20	20	19
3	17,5	14,5	8.5
4	13,5	14	14.5
5	16,5	16,5	9.5
6	19	18	18
7	15,5	13,5	10.5
8	17	17	16
9	17	16	16
10	15,5	12	11
11	18	16	18
12	16	14	10

Más adelante se pueden apreciar los valores de alcalinidad para los puntos de muestreo (figuras 10-12).

Se puede observar que el afluente de la PTAP cuenta con una baja alcalinidad que oscila entre 13 y 20 mg/L, lo cual indica que el agua es de difícil coagulación.

La alcalinidad no varía de manera representativa en los procesos de tratamiento y se encuentra por debajo de los límites máximos permitidos por la Resolución 2115 de 2007.

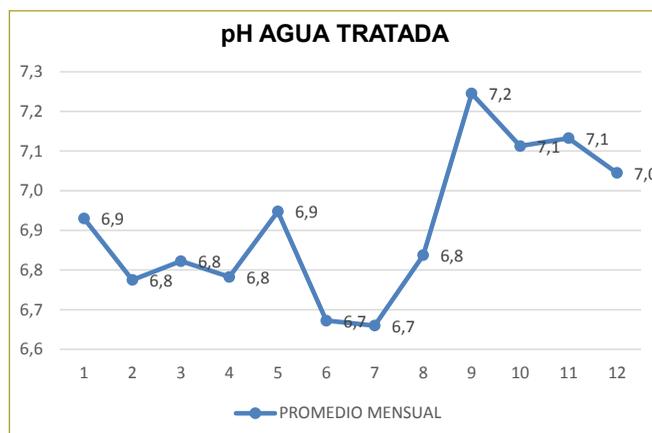


Figura 8. Valores de pH en el efluente de la planta de tratamiento.

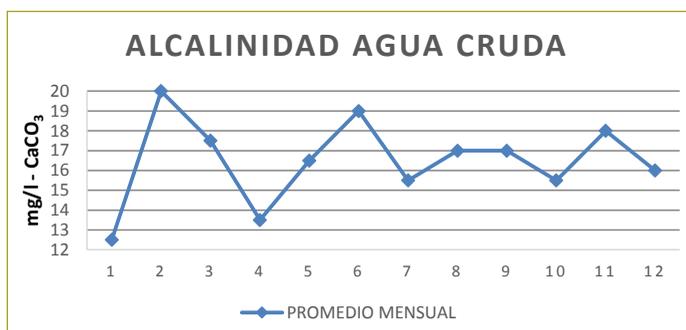


Figura 9. Alcalinidad en el afluente de la planta de tratamiento.

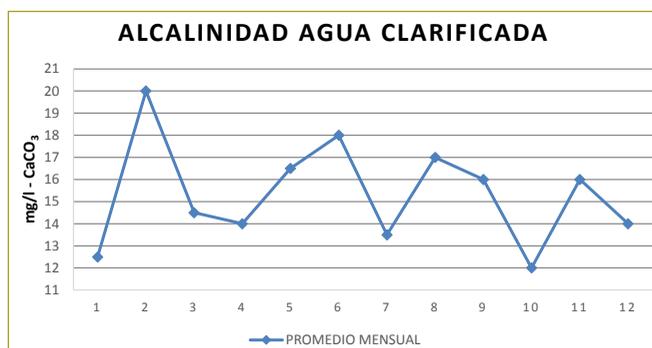


Figura 10. Alcalinidad en el efluente del sedimentador.

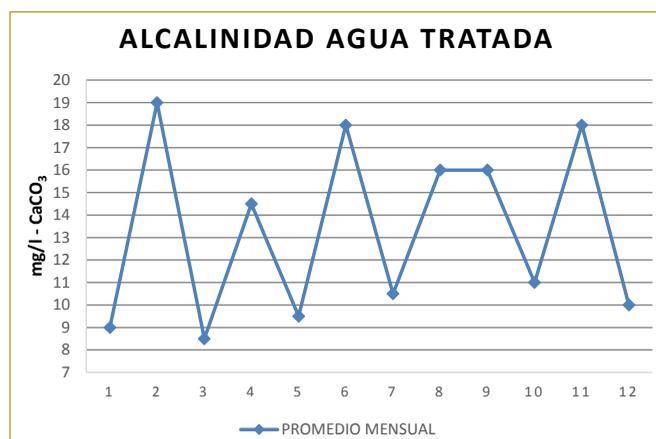


Figura 11. Alcalinidad en el efluente de la planta de tratamiento.

Color

Tabla 4
Valores de color aparente promedio mensual en los cuatro puntos de muestreo

Color (UPC)										
Mes	Agua cruda			Agua clarificada			Agua filtrada			Agua tratada
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio
1	201	229	151	13	14	11	13	5	0	13
2	322	355	304	29	32	26	9	14	6	10
3	346	439	282	120	200	40	51	92	6	32
4	587	699	366	155	190	25	52	20	11	23
5	464	526	355	93	120	36	11	14	8	14
6	337	349	325	52	60	43	13	13	12	13
7	260	276	233	43	46	38	16	18	14	14
8	187	240	165	62	68	59	13	16	8	10
9	131	149	116	35	36	32	9	10	7	9
10	123	145	100	40	48	32	9	15	3	5
11	143	166	129	38	39	36	11	12	9	9
12	94	101	86	19	26	11	6	7	4	5

A continuación se pueden ver los valores de color aparente, en los cuatro puntos de muestreo (tabla 4 y figuras 15-18). El color del agua de entrada oscila entre 86 y 699 UPC, con valores máximos en el mes de abril y mayo (figura 12).

El color del agua clarificada varía entre 11 y 200 UPC, con valores máximos en el mes de mayo (figura 13). El valor del agua tratada cambia entre 0 y 92 UPC, con un valor máximo en el mes de mayo (figura 14).

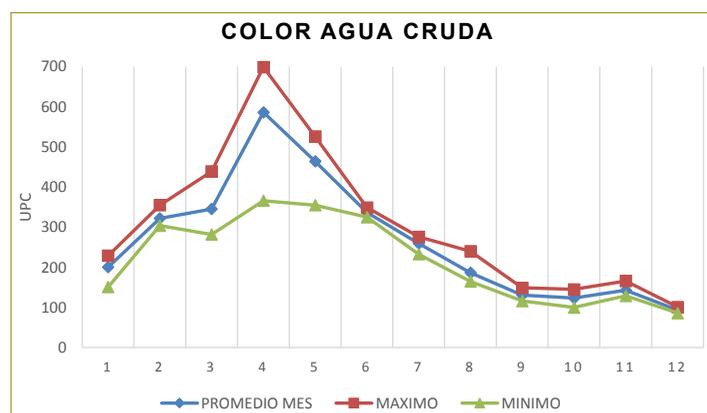


Figura 12. Color en el afluente de la planta de tratamiento.

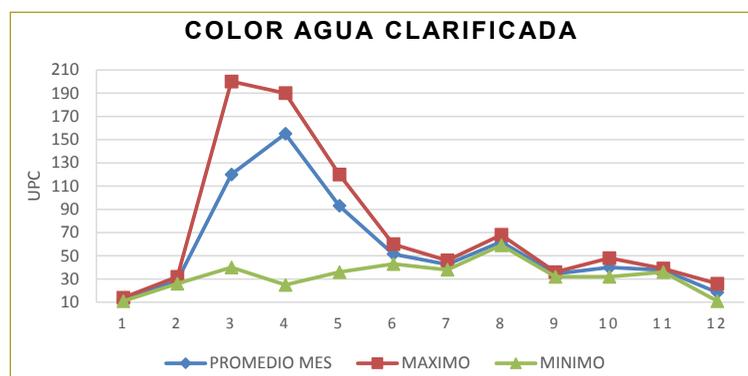


Figura 13. Color en el efluente del sedimentador.

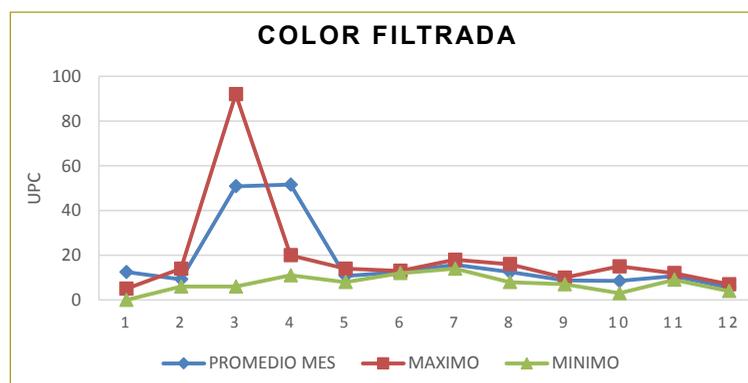


Figura 14. Color en el efluente de los filtros.

Al comparar los resultados de la figura 13 con los de la figura 14 se puede observar que en la filtración no se realiza una remoción representativa de color; la mayoría de los valores se mantienen, excepto los meses de marzo y abril, porque las unidades presentes de color en la fuente de abastecimiento son altas.

La variación entre los valores del agua filtrada (punto 3 de muestreo) y el agua tratada (punto 4 de muestreo) es apreciable en los meses de marzo y abril (tabla 18) y en menor proporción en julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre, debido al efecto probable de la cloración.

Igualmente, se muestran las unidades de color del efluente del sistema de tratamiento, evidenciando que en los meses de marzo y abril no se cumplió con el valor máximo permitido en la Resolución 2115 de 2007, para agua potable (figura 15).

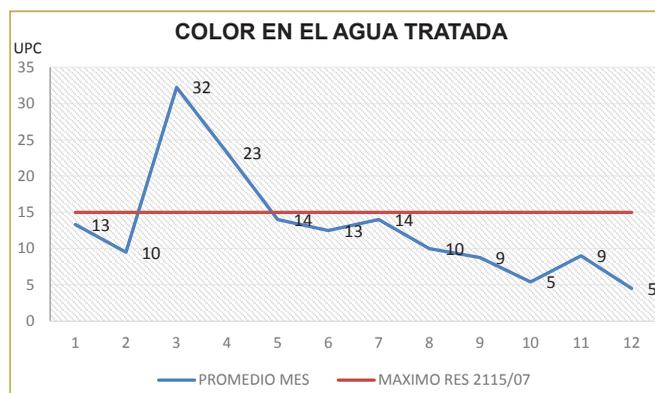


Figura 15. Color en el efluente de la planta de tratamiento.

Manganeso

Tabla 5
Concentración de manganeso en los cuatro puntos de muestreo

Mes	Manganeso agua cruda			Manganeso agua clarificada			Manganeso agua filtrada			Manganeso agua tratada		
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo
1	0,05	0,06	0,00	0,05	0,07	0,00	0,05	0,08	0,00	0,05	0,08	0,00
2	0,05	0,08	0,05	0,05	0,08	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,00
3	0,05	0,07	0,05	0,05	0,07	0,00	0,05	0,05	0,00	0,05	0,05	0,00
4	0,18	0,50	0,10	0,17	0,43	0,10	0,16	0,20	0,09	0,15	0,18	0,09
5	0,15	0,42	0,08	0,15	0,38	0,09	0,14	0,23	0,07	0,14	0,19	0,07
6	0,08	0,12	0,05	0,07	0,09	0,05	0,05	0,08	0,05	0,05	0,08	0,05
7	0,06	0,08	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,07	0,05	0,06	0,07	0,05
8	0,09	0,14	0,05	0,08	0,10	0,05	0,07	0,10	0,05	0,07	0,12	0,05
9	0,06	0,09	0,05	0,05	0,09	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,07	0,00
10	0,11	0,36	0,15	0,1	0,36	0,12	0,08	0,15	0,05	0,08	0,10	0,05
11	0,06	0,09	0,05	0,05	0,08	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,07	0,00
12	0,05	0,08	0,00	0,05	0,08	0,00	0,05	0,08	0,00	0,05	0,05	0,00

Así mismo, se puede observar que las concentraciones máximas de manganeso en la fuente de abastecimiento se dieron en los meses de abril, mayo y octubre, coincidiendo en los meses de abril y mayo con el incremento del color; lo anterior demuestra que estos parámetros están directamente relacionados, puesto que el incremento del color aparente en el agua es el mayor indicador visual de la posible presencia de manganeso en el agua (figura 16).

También es pertinente destacar que el aumento de manganeso en los meses de abril y mayo coincide con los meses de mayores precipitaciones en la cuenca media del río Bogotá. Aparentemente, la mayor intensidad de lluvia aporta incremento de manganeso por la escorrentía o por suspensión de lodo sedimentado en el río.

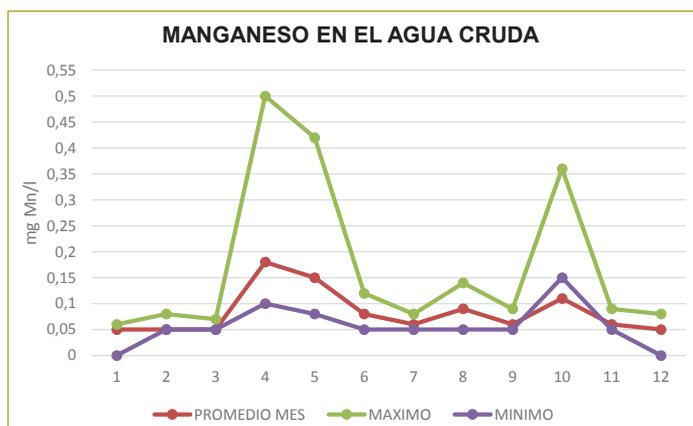


Figura 16. Concentración de manganeso en el agua cruda.

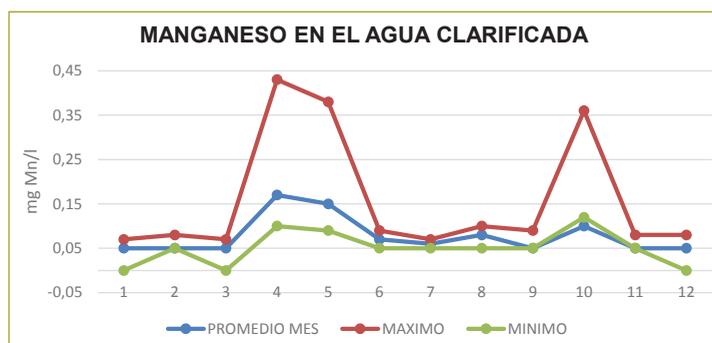


Figura 17. Concentraciones de manganeso en el efluente del sedimentador.

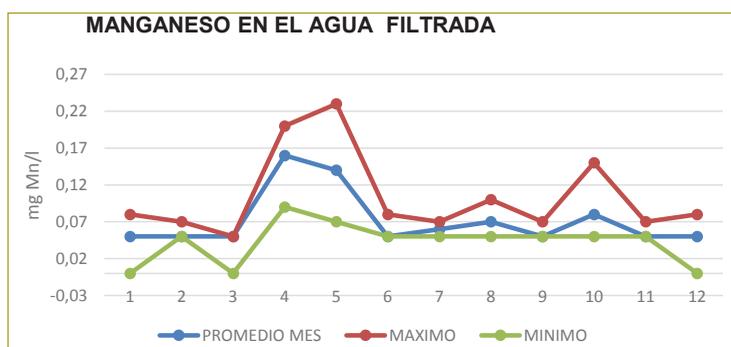


Figura 18. Concentración de manganeso en el efluente de filtros.

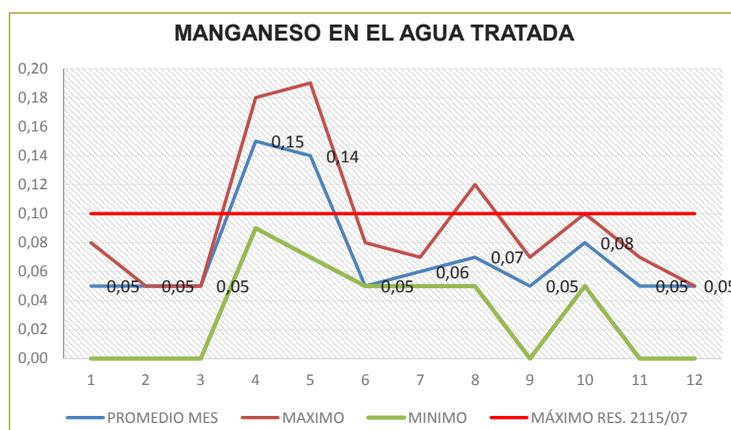


Figura 19. Datos de manganeso en el efluente de la planta de tratamiento.

Las concentraciones de manganeso se mantienen iguales en el agua filtrada y en el efluente de la planta, lo que indica que la desinfección no tiene efecto en la remoción de manganeso.

Además, se observan las concentraciones de manganeso en el agua tratada, evidenciando que las concentraciones promedio cumplen con el valor máximo

permisible para agua potable de 0,1 mg Mn/L, excepto en los meses de abril y mayo (figura 19).

A su vez, los porcentajes de remoción de manganeso varían entre 0 y 37 %, lo que indica que el H₂O₂ no logra altas remociones de manganeso, en este caso, para agua de baja concentración (figura 20).

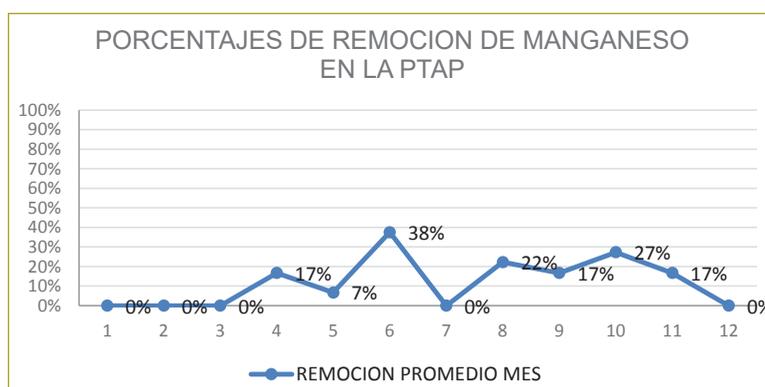


Figura 20. Porcentajes de Remoción de Manganeso de la PTAP.

Análisis del proceso de oxidación

Tabla 6
Resumen de condiciones y resultados de la oxidación con peróxido de hidrógeno (2015)

Mes	Agua cruda			Agente oxidante Dosis promedio (H ₂ O ₂)	Agua tratada				
	pH	Mn promedio (mg/l)	Fe promedio (mg/l)		pH	Mn promedio (mg/l)	Fe promedio (mg/l)	Remoción Promedio Mes Mn	Remoción Promedio Mes Fe
Enero	7,3	0,05	0,8	1,5	6,9	0,05	0,10	0 %	88 %
Febrero	6,8	0,05	1,0	3	6,8	0,05	0,09	0 %	91 %
Marzo	7,0	0,05	1,1	4	6,8	0,05	0,09	0 %	92 %
Abril	7,0	0,18	1,1	5	6,8	0,16	0,08	17 %	93 %
Mayo	7,4	0,15	1,0	3	6,9	0,14	0,08	7 %	92 %
Junio	7,1	0,08	1,1	2,5	6,7	0,05	0,28	38 %	74 %
Julio	7,3	0,06	0,8	4,5	6,7	0,06	0,11	0 %	86 %
Agosto	7,1	0,09	1,4	2	6,8	0,07	0,18	22 %	87 %
Septiembre	7,5	0,06	0,9	3	7,2	0,05	0,07	17 %	92 %
Octubre	7,3	0,11	1,1	4	7,1	0,08	0,13	27 %	88 %
Noviembre	7,3	0,06	1,1	1,5	7,1	0,05	0,22	17 %	81 %
Diciembre	7,2	0,05	1,2	2	7,0	0,05	0,13	0 %	89 %

En la tabla anterior (tabla 6) se puede observar que las concentraciones de hierro y manganeso en el agua cruda son bajas: para el hierro oscilan entre 0,8 y 1,4 mg/L y para el manganeso fluctúan entre 0,05 y 0,18 mg/L.

Las dosis de peróxido de hidrógeno varían entre 1,5 y 5 mg/L. La oxidación de hierro (Fe) permite en todos los meses satisfacer el valor máximo establecido por la norma de 0,3 mg/L en agua potable y se obtienen eficiencias de remoción altas, del orden de 88 a 93 %.

La oxidación con peróxido de hidrógeno no permitió de forma permanente la obtención de un residual menor de 0,1 mg/L – Mn, como lo exige la norma para agua potable. Dado que el pH del agua oxidada es inferior a 7,2 en todos los casos, se puede afirmar que para mejorar la eficiencia en remoción de manganeso es necesario contar con rangos óptimos de pH, probablemente mayores de 10, como se indica en la bibliografía consultada.

CONCLUSIONES

- El sistema de tratamiento convencional del municipio de Tocancipá (Cundinamarca) no logra remoción

de manganeso, con peróxido de hidrógeno, para dar cumplimiento permanente a la Resolución 2115 de 2007.

- La fuente de abastecimiento (el río Bogotá a la altura de la bocatoma del sistema de purificación) presenta valores de pH entre 6,8 y 7,5 unidades y alcalinidad entre 12,5 y 20 mg/L, los cuales son bajos y no son favorables para la remoción de manganeso.
- El manganeso es un elemento que requiere pH alto para su precipitación y remoción, como lo indican la experiencia analizada y la bibliografía revisada y referenciada en este estudio. Para lograr una oxidación adecuada se recomiendan valores superiores a diez unidades de pH.
- Desde el punto de vista hidráulico, la planta opera adecuadamente y cumple con los parámetros establecidos en las normas técnicas para diseño de PTAP.
- Se observa un incremento en el valor promedio de la turbiedad, el color y el manganeso en los meses de marzo y abril, lo cual coincide con el incremento histórico de las precipitaciones en el municipio y en la cuenca alta del río Bogotá, que se da en estos meses.
- Se recomienda realizar ensayos de jarras permanentes para optimizar el proceso de tratamiento, con el

fin de cumplir con las remociones adecuadas y dar cumplimiento permanente a los valores establecidos en la Resolución 2115 de 2007, minimizar los costos de tratamiento y determinar:

- pH óptimo de coagulación.
- Dosis óptima y tipo de oxidante.
- Gradiente de mezcla.
- Tiempo de contacto óptimo para la reacción de oxidación.

REFERENCIAS

- American Water Works Association (s.f.). *Treatment technologies for groundwater*.
- American Water Works Association (2012). *Water treatment plant design* (fifth Edition). McGraw Hill.
- APHA, AWWA, WEF (2004). Standard methods for the examination of water and wastewater (18th ed.). Washington: American Public Health Association.
- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua* (3.ª ed.). México: McGraw Hill.
- Best Practice Guide on Metals Removal from Drinking Water*.
- Cleasby, J.L (1975). Iron And Manganese Removal. A Case Study. *Journal AWWA*, 67 (3), 147.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2006). Adecuación hidráulica y recuperación ambiental del río Bogotá.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2006). Acuerdo 43 del 17 de octubre de 2006. Bogotá.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2006). Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá. Bogotá.
- Davison, W. (1993). Iron and manganese in lakes. *Earth-Science Review*, 34, 119-163.
- Ditoro, D. (2001). Sediment flux modeling. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc.
- Edzwald, J.K. (s.f.). *Water quality and treatment*. AWWA - MacGraw Hill.
- EPA (2004). Drinking water health advisory for manganese. Health and Ecological Criteria Division.
- EPA (2006). Occurrence of manganese in drinking water and manganese control.
- Hanson, A., Bates, J., Bristol, D., & Heil, A. (1999). Arsenic removal from water using manganese greensand: Laboratory Scale Batch And Column Studies. *Water Treatment Technology Program Report*, N°. 41. New Mexico State University.
- <https://www.cleanwaterstore.com/blog/can-hydrogen-peroxide-be-used-to-remove-manganese-and-iron-from-well-water/>. (Mayo 3 de 2015) The study found that "hydrogen peroxide at these (varying) pH levels did not prove to be an adequate oxidizing agent for manganese.
- Huerta-Díaz, M.A. (2004). Oxihidróxidos de hierro y manganeso. En M.A. Huerta-Díaz. *Geoquímica de sedimentos*. México: Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Universidad Autónoma de Baja California. División de Geoquímica Ambiental.
- Knocke, W.R., Occiano, S., & Hungate, R. (1990). *Removal of soluble manganese from water by oxide-coated filter media*. Denver, Colorado: Awwa Research Foundation and American Water Works Association.
- Mackenzie, R.M. (1980). The adsorption of lead and other heavy metals on oxides of manganese and iron. *Aust. J. Soil Res.*, 18, 61-73.
- McFarland, M.L., & Dozier, M.C. (s.f.). Problemas del agua potable: el hierro y el manganeso. Texas: Sistema Universitario de Texas A&M.
- Ministerio de Desarrollo Económico (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de la Protección Social - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2007). Resolución 2115 de 2007, "Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano".
- Morgan, J. J. (1967). Chemical equilibria and kinetic properties of manganese in natural waters. En S.D. Faust & J. V. Hunter, *Principles and applications of water chemistry* (pp. 561-623). John Wiley and Sons, Inc.
- Posselt, H., Anderson, F., & Weber, W. (1968). Ocurrencia de manganeso en el agua potable y el control de manganeso. Washington, D.C.: AWWA Research Foundation, American water works association, & IWA Publishing.
- Postawa, A., & Hayes, C. (s.f.). *Best Practice Guide on the Control of Iron and Manganese*. The International Water Association.
- Ramstedt, M. (2004). *Chemical Processes at the Water-Manganite (g- MnOOH) Interface*. Tesis de grado. Department of Chemistry, Inorganic Chemistry. Umeå University Sweden.
- Removal of manganese from water supplies intended for human consumption: a case study. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Catania, Italy.
- Romero R., J. (2006). *Purificación del agua*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero R., J. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sommerfeld, E.O. (2000). *Iron and Manganese Removal Handbook*. American Water Works association.
- Spellman, F.R. (s.f.). The science of water concepts and applications. Lancaster Basel.
- Standart Methods.
- Stevenson, D.G. (s.f.). *Water treatment unit processes*. Imperial College Press.
- U.S. Environmental Protection Agency (s.f.). Health effects for manganese.
- U.S. Department of Health and Human Services (2012). Toxicological profile for manganese. Atlanta.
- U.S. Environmental Protection Agency (s.f.). Drinking water criteria for manganese. Bibliogov.
- U.S. Environmental Protection Agency (s.f.). Iron and manganese removal.

Análisis del comportamiento de barras corrugadas posinstaladas con adhesivo epóxico en concreto ligero, sometidas a tensión y cortante

Analysis of post-installed corrugated bars with epoxy adhesive in light concrete subject to tension and shear tests

CAROLINA VIASÚS ARTEAGA¹ - PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

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

carolina.viasus@mail.escuelaing.edu.co - pedro.quiroga@escuelaing.edu.co

Recibido: 18/09/2019 Aceptado: 05/10/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En el país, y en general en el mundo, el estudio de anclajes posinstalados se ha limitado a concretos de densidad y resistencia convencionales, dejando a un lado las otras posibilidades que ofrece el mercado, tales como concretos livianos. Esto lleva, a su vez, a poca información e investigación cuantificada acerca del comportamiento estructural en concretos ligeros.

Debido a lo anterior, se planteó un programa experimental en el cual se analizó el comportamiento de barras corrugadas ancladas en concreto liviano. Para esto, se construyeron 7 losas macizas de concreto, en las cuales se anclaron 39 barras corrugadas; 33 de estos anclajes se ensayaron a tensión, mientras que las seis barras restantes se ensayaron a cortante. Es importante mencionar que la resistencia del concreto fue de 21 MPa.

Los resultados obtenidos de estos ensayos se compararon con las ecuaciones que determinan la resistencia teórica de los anclajes, así como la modalidad de falla esperada de éstos ante diferentes disposiciones geométricas y de materiales. Se pudo observar que para los ensayos confinados a tensión la falla predominante se presenta en el epóxico, en tanto que los ensayos a cortante muestran fallo en concreto.

Para los ensayos no confinados, se concluyó que la falla predominante fue en el concreto; además, se realizó la aclaración de que es necesario respetar las distancias al borde mínimas establecidas por el ACI 318s-14, capítulo 17, ya que al no hacerlo los cálculos presentarán significativas diferencias frente a lo esperado.

Palabras claves: anclajes, barras corrugadas, concreto liviano, resistencia, falla.

Abstract

In the country and in general in the world, the study of post-installed anchors has been limited to conventional density and resistance concrete, leaving aside the different possibilities offered by the market, such as lightweight concrete. This in turn leads to little information and quantified research about structural behavior in light concrete.

Due to the above, an experimental program was proposed in which the behavior of corrugated bars anchored in light concrete was analyzed. For this, 7 solid concrete slabs were built, in which 39 corrugated bars were anchored, 33 of these anchors were tension tested, while the remaining six bars were shear tested. It is important to mention that the concrete strength was 21 MPa.

The results obtained from these tests were compared with the equations that determine the theoretical resistance of the anchors, as well as the expected failure modality of the same, before different geometric and material arrangements. It was observed that for the tests confined to tension the predominant fault occurs in the epoxy and the shear tests presents a specific failure.

For the unconfined trials it was concluded that the predominant fault was in the concrete, in addition the clarification was made that it is necessary to respect the distance to the edge of the mines established by the ACI 318s-14 chapter 17, since by not doing so, the calculations will present significant differences than expected.

Keywords: anchors, corrugated bars, light concrete, strength, failure.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda continua de nuevas tecnologías en materiales ha llevado a utilizar el concreto liviano, el cual, sin disminuir su resistencia, genera un impacto económico positivo en los proyectos de construcción, al reducir la carga muerta de la estructura y, por tal razón, de su fundación. Actualmente, el uso del concreto liviano no es muy común en Colombia.

Los anclajes posinstalados se emplean con frecuencia en casos de reforzamiento estructural para anclar equipos mecánicos en sitios donde por procedimientos constructivos no se puedan utilizar anclajes preinstalados y tienen un alto uso en sistemas no estructurales. Sin embargo, a pesar de su amplio campo de utilización, todavía no se cuenta con la suficiente información para diseñarlos en concreto liviano.

En los reglamentos actuales NSR-10 y ACI-318 no se incluyen parámetros, normativas o guías de diseño en anclajes fijados con resina epóxica en concreto liviano. En el ACI-318-14, capítulo 17, se considera un parámetro, independientemente del tipo de concreto liviano, mientras que en la NSR-10 no se toman en cuenta los anclajes adhesivos.

En ese contexto, la presente tesis se enfoca en la realización de ensayos que permitan predecir el comportamiento de este tipo de anclajes al estar sometidos a cargas de tensión y de cortante en concreto liviano.

RESULTADOS

A continuación se expondrán los resultados obtenidos a lo largo de la investigación mediante la aplicación de los diferentes tipos de ensayos realizados (tablas 1-3).

Tabla 1
Resultados obtenidos de ensayos a cortante

Diámetro (pulg)	hef (mm)	Carga de falla (kN)
3/8"	130	19,52
		17,71
		16,59
		18,81
1/2"	130	20,67
		14,37

Tabla 2
Resultados de ensayos confinados a tracción

Diámetro (pulg)	Profundidad anclaje (mm)	Tipo	Carga de falla (kN)	Carga de falla promedio ((kM)	Modo de falla	h/d
3/8"	48	Confinado	31,52	37,43	Adherencia	5
3/8"	48	Confinado	36,45			5
3/8"	48	Confinado	44,33			5
3/8"	95	Confinado	49,52	46,63	Adherencia	10
3/8"	95	Confinado	46,3			10
3/8"	95	Confinado	44,33			10
1/2"	64	Confinado	22,81	33,39	Adherencia	5
1/2"	64	Confinado	44,95			5
1/2"	64	Confinado	32,42			5
1/2"	127	Confinado	80,28	75,51	Adherencia	10
1/2"	127	Confinado	76,77			10
1/2"	127	Confinado	69,48			10
5/8"	79	Confinado	41,63	58,6	Adherencia	5
5/8"	79	Confinado	61,41			5
5/8"	79	Confinado	72,76			5
5/8"	159	Confinado	117,22	114,6	Adherencia	10
5/8"	159	Confinado	130,03			10
5/8"	159	Confinado	96,54			10

Tabla 3
Resultados de ensayos no confinados a tracción

Diámetro (pulg)	Profundidad anclaje (mm)	Tipo	Carga de falla (kN)	Carga de falla promedio ((kM)	Modo de falla	h/d
3/8"	48	No confinado	19,19	18,12	Arrancamiento	5
3/8"	48	No confinado	16,45			5
3/8"	48	No confinado	18,72			5
3/8"	95	No confinado	33,7	36,52	Arrancamiento	10
3/8"	95	No confinado	34,48			10
3/8"	95	No confinado	41,37			10
1/2"	64	No confinado	31,52	28,24	Arrancamiento	5
1/2"	64	No confinado	25,61			5
1/2"	64	No confinado	27,58			5
1/2"	127	No confinado	61,07	56,8	Arrancamiento	10
1/2"	127	No confinado	56,15			10
1/2"	127	No confinado	53,19			10
5/8"	79	No confinado	42,55	37,27	Arrancamiento	5
5/8"	79	No confinado	43,64			5
5/8"	79	No confinado	25,61			5

A continuación se muestran, de manera gráfica, las cargas de falla para ensayos confinados y no confinados a tensión (figuras 1 y 2).

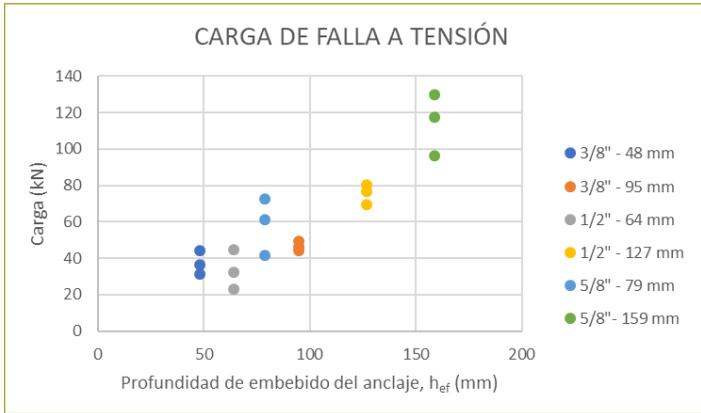


Figura 1. Cargas de falla en ensayos confinados a tracción.

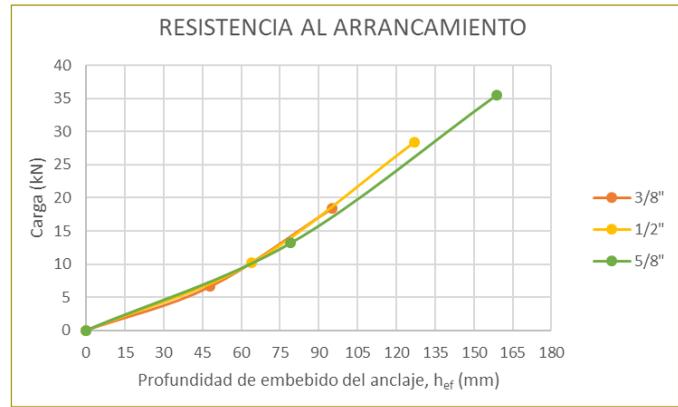


Figura 3. Resistencia teórica al arrancamiento.

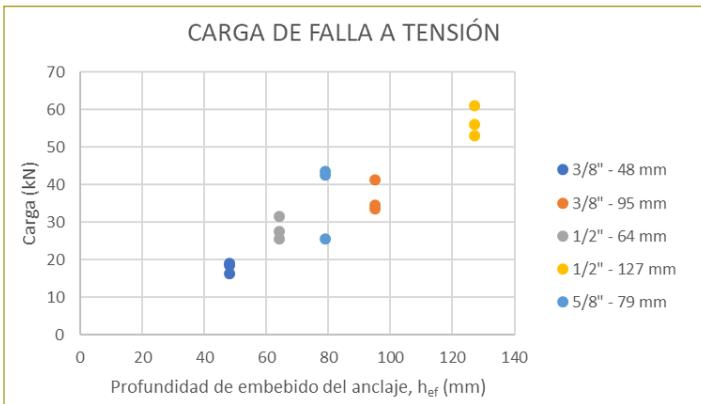


Figura 2. Cargas de falla en ensayos no confinados a tracción.

A continuación se presentarán las resistencias teóricas correspondientes al arrancamiento, a la adherencia y del acero sometido a cortante, respectivamente (tablas 4-6). Se evidenciarán de manera gráfica las resistencias teóricas anteriormente mencionadas para una mejor comprensión (figuras 3-5).

Tabla 4
Resistencia teórica al arrancamiento

Tipo de ensayo	Diámetro (pulg)	h_{ef} (mm)	$\frac{A_{nc}}{A_{nco}}$	$\Psi_{ed,N}$	$\Psi_{c,N}$	$\Psi_{ep,N}$	N_b (kN)	N_{cb} (kN)
No confinado	3/8"	48	1	1	1,4	0,75	7,42	7,79
No confinado	1/2"	64	1	1	1,4	0,75	11,42	11,99
No confinado	5/8"	79	1	0,9	1,4	0,75	15,66	15,51
No confinado	3/8"	95	1	1	1,4	0,75	20,65	21,68
No confinado	1/2"	127	1	1	1,4	0,75	31,92	33,51

Tabla 5
Resistencia teórica a la adherencia

Tipo de ensayo	Diámetro (pulg)	h_{ef} (mm)	$\frac{A_{nc}}{A_{nco}}$	$\Psi_{ed,N}$	$\Psi_{c,N}$	$\Psi_{ep,N}$	N_b (kN)	N_{cb} (kN)
Confinado	3/8"	48	0,74	1	0,91	0,75	5,77	2,89
Confinado	1/2"	64	0,72	1	0,91	0,75	9,76	4,77
Confinado	5/8"	79	0,31	0,9	0,9	0,75	14,09	2,91
Confinado	1/2"	127	0,89		1	0,75	19,38	12,96
Confinado	3/8"	95	1	1	1	0,75	11,42	8,57
Confinado	5/8"	159	0,73	1	1	0,75	28,35	15,52

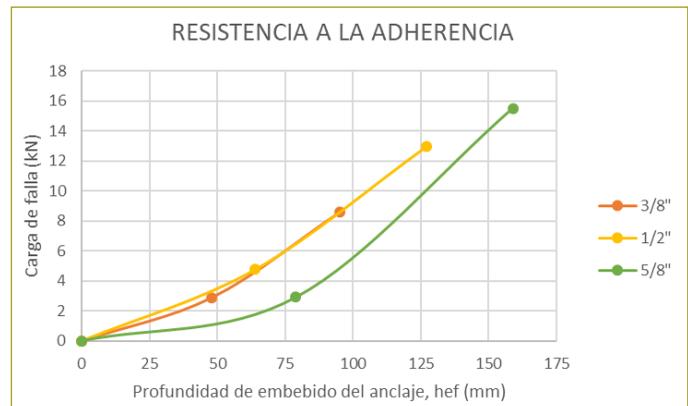


Figura 4. Resistencia teórica a la adherencia.

Tabla 6
Resistencia teórica del acero a cortante

Diámetro en pulgadas	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	f _{uta} (MPa)	V _{sa} (kN)
1/4"	6,4	32	550	10,56
3/8"	9,5	71	550	23,43
1/2"	12,7	129	550	42,57
5/8"	15,9	199	550	65,67
3/4"	19,1	284	550	93,72
7/8"	22,2	387	550	127,71
1"	25,4	510	550	168,3
1-1/8"	28,7	645	550	212,85
1-1/4"	32,3	819	550	270,27
1-3/8"	35,8	1006	550	331,98
1-3/4"	43	1452	550	479,16
2-1/4"	57,3	2581	550	851,73



Figura 5. Resistencia teórica del acero a cortante.

La presente investigación también permite comparar los resultados obtenidos con otras investigaciones, las cuales corresponden a “Anclajes con barra enroscada en placas elaboradas con concretos livianos”, desarrollada por el ingeniero Ronald Camilo Martínez Ramírez, y “Comportamiento de anclajes posinstalados en concreto de alta resistencia, sometidos a carga de tensión y corte”, realizada por el ingeniero Humberto Morales.

En las tablas siguientes (tablas 7-9) se hace un paralelo entre los resultados obtenidos en la presente investigación y la tesis desarrollada por el ingeniero Ronald Camilo Martínez Ramírez. Así mismo, se muestra de manera gráfica lo evidenciado en las tablas anteriormente mencionadas (figuras 6-8).

Tabla 7
Comparación de la carga de falla para barras corrugadas y roscadas en ensayos confinados a tensión

Diámetro (pulg)	Profundidad anclaje (mm)	Carga de falla (kN)	Carga de falla promedio barra corrugada (kN)	Carga de falla promedio barra enroscada (kN)
3/8"	48	31,52	37,43	39,03
		36,45		
		44,33		
	95	49,25	46,63	
		46,3		
		44,33		
1/2"	64	22,81	33,39	42,71
		44,95		
		32,42		
	127	80,28	75,51	
		76,77		
		69,48		
5/8"	79	41,63	58,6	47,28
		61,41		
		72,76		
	159	117,22	114,6	
		130,03		
		96,54		



Figura 6. Comparación gráfica de carga de falla para barras corrugadas y roscadas a ensayos confinados a tensión.

Tabla 8
Comparación de la carga de falla para barras corrugadas y roscadas en ensayos no confinados a tensión

Diámetro (pulg)	Profundidad anclaje (mm)	Carga de falla promedio barra corrugada (kN)	Carga de falla promedio barra enroscada (kN)
3/8"	48	18,12	21,35
	95	36,52	38,66
1/2"	64	28,24	25,46
5/8"	127	56,8	39
	79	37,27	31,9

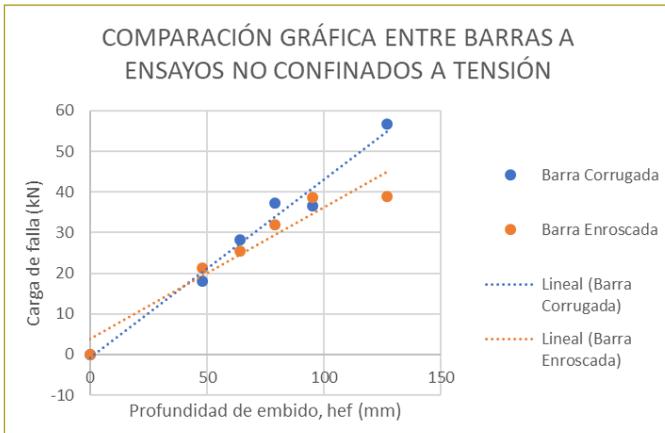


Figura 7. Comparación gráfica de cargas de falla para barras corrugadas y roscadas a ensayos no confinados a tensión.

Tabla 9

Comparación de carga de falla para barras corrugadas y roscadas en ensayos a cortante

Diámetro (pulg)	h_{ef} (mm)	Carga de falla (kN)	Carga de falla promedio barra corrugada (kN)	Carga de falla promedio barra enroscada (kN)
3/8"	100	19,52	18,16	18,16
		17,71		
		16,59		
		18,81		
1/2"	125	20,67	17,52	21,14
		14,37		

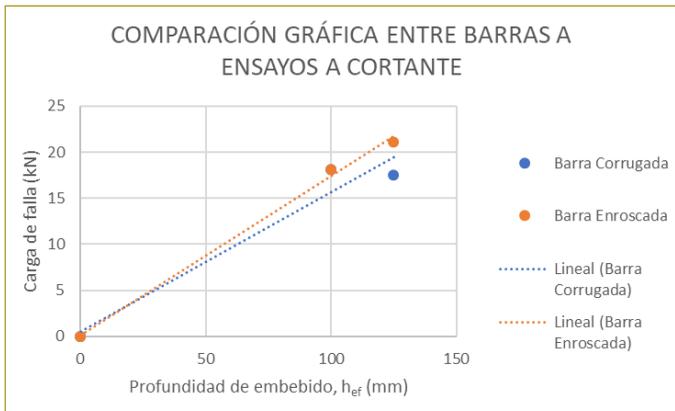


Figura 8. Comparación gráfica de cargas de falla para barras corrugadas y roscadas en ensayos a cortante.

Más adelante se hace un paralelo entre los resultados obtenidos en la presente investigación y la tesis desarrollada por el ingeniero Humberto Morales (tablas 10-12). Así mismo, se muestra de manera gráfica lo

evidenciado en las tablas anteriormente mencionadas (figuras 9-11).

Tabla 10

Comparación de carga de falla para barras corrugadas en concreto liviano y roscadas en concreto de alta resistencia a ensayos confinados a tensión

Diámetro (pulg)	Profundidad anclaje (mm)	Carga de falla (kN)	Carga de falla promedio barra corrugada (kN)	Carga de falla promedio barra enroscada (kN)
3/8"	48	31,52	37,43	15,1
		36,45		
		44,33		
	95	49,25	46,63	15,2
		46,3		
1/2"	64	22,81	33,39	27,3
		44,95		
		32,42		
	127	80,28	75,51	35,5
		76,77		
5/8"	79	41,63	58,6	40,3
		61,41		
		72,76		
	159	117,22	114,6	44,2
		130,03		
	96,54			

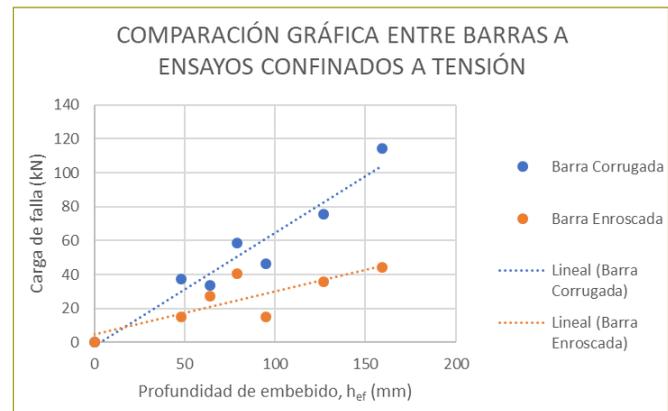


Figura 9. Comparación de carga de falla para barras corrugadas en concreto liviano y roscadas en concreto de alta resistencia a ensayos confinados a tensión.

Tabla 11

Comparación de la carga de falla para barras corrugadas en concreto liviano y roscadas en concreto de alta resistencia en ensayos no confinados a tensión

Diámetro (pulg)	Profundidad anclaje (mm)	Carga de falla (kN)	Carga de falla promedio barra corrugada (kN)	Carga de falla promedio barra enroscada (kN)
3/8"	48	19,19	18,12	39
		16,45		
		18,72		
	95	33,7	36,52	47,6
		34,48		
		41,37		
1/2"	64	31,52	28,24	42
		25,61		
		27,58		

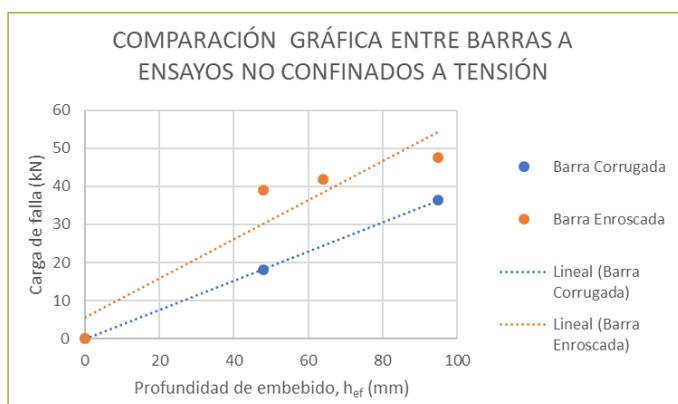


Figura 10. Comparación gráfica de cargas de falla para barras corrugadas en concreto liviano y roscadas en concreto de alta resistencia a ensayos no confinados a tensión.

Tabla 12

Comparación de carga de falla para barras corrugadas en concreto liviano y roscadas en concreto de alta resistencia a ensayos de cortante

Diámetro (pulg)	h_{ef} (mm)	Carga de falla (kN)	Carga de falla promedio barra corrugada (kN)	Carga de falla promedio barra enroscada (kN)
3/8"	100	19,52	18,16	15,1
		17,71		
		16,59		
		18,81		
1/2"	125	20,67	17,52	26,4
		14,37		

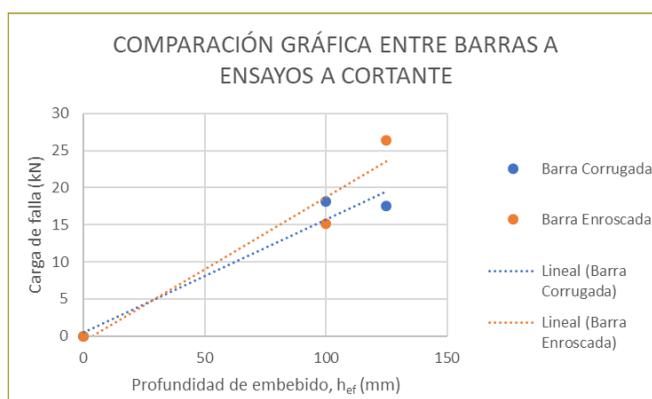


Figura 11. Comparación gráfica de cargas de falla para barras corrugadas en concreto liviano y roscadas en concreto de alta resistencia en ensayos de cortante.

CONCLUSIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos de los ensayos, el hecho de tener un proceso claro y correcto desde la dosificación de la mezcla hasta la correcta limpieza de los agujeros para los anclajes y la correcta aplicación del adhesivo epóxico permite obtener el modo de falla esperado al utilizar concreto liviano.
- En condiciones no confinadas, la resistencia de anclajes en concreto de alta resistencia es mayor que la resistencia en concreto liviano.
- Al hacer un paralelo entre la modalidad de falla de los anclajes posinstalados de concreto liviano con barra corrugada y los anclajes en concreto liviano con barra enroscada se evidencian importantes similitudes en ensayos no confinados a tensión y cortante.
- Es importante respetar las distancias mínimas a los bordes dadas por el ACI 318S-14, capítulo 17, ya que al no hacerlo se evidencia discrepancia entre los resultados esperados y los resultados obtenidos; tal cual fue el caso de los ensayos confinados a tensión, en los que los valores de resistencia teórica poseían una gran discrepancia frente a los valores promedio de falla obtenidos en campo.
- A mayor profundidad de embebido, mayor es la carga de falla del anclaje.
- Al hacer la comparación entre los valores de resistencia nominal de acuerdo con la norma y valores experimentales se encontraron resistencias teóricas hasta seis veces menores en comparación con las resistencias obtenidas experimentalmente. Esto se debe en parte a que las expresiones provistas en el código ACI 318 son conservadoras e incluyen varios factores de reducción.

Detección de *Legionella pneumophila* y su impacto en salud pública en el agua potable de un hospital municipal

Legionella pneumophila detection and its impact on public health in drinking water at a municipal hospital

PAULA JULIETH HERRERA LÓPEZ¹ - GLADYS ROCÍO GONZÁLEZ LEAL²

1. Magíster en Ingeniería Civil.

2. Bióloga. Especialista en microbiología. Profesora titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

paula.herrera-l@mail.escuelaing.edu.co - gladys.gonzalez@escuelaing.edu.co

Recibido: 25/09/2019 Aceptado: 15/10/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

La *Legionella pneumophila* es una bacteria que se encuentra de forma natural en ambientes acuáticos, predominantemente en fuentes de agua superficiales, como lagos, ríos o estanques. Desde su hábitat natural puede colonizar los sistemas de abastecimiento hídrico de una ciudad, y a través de las redes de distribución, ingresar como organismo patógeno al ser humano. El objetivo principal de este artículo consiste en evaluar la presencia de *Legionella pneumophila* en muestras de agua tomadas de tres puntos de un hospital municipal; si bien no es habitual su detección, sí son bastante oportunas su identificación, cuantificación y posible eliminación del recurso hídrico.

Palabras claves: *Legionella pneumophila*, bacteria, transmisión, patógeno, salud pública.

Abstract

Legionella pneumophila is a bacterium naturally found in aquatic environments, its habitat predominates in surface natural water sources, such as lakes, rivers, or ponds. From its natural habitat it can colonize the water supply systems of a city, and through the distribution networks enter the human being as a pathogenic organism. The present work assumed as main objective to evaluate the presence of *Legionella pneumophila* in water samples taken from three different points of a municipal hospital, which, although its detection is not usual, its identification, quantification, and possible elimination of the hydric resource are.

Keywords: *Legionella pneumophila*, bacteria, transmission, pathogen, public health.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, las infecciones por bacterias atípicas son responsables del 2 al 37 % de los casos de neumonía adquirida en la comunidad (Arias Guzmán, 2016), pero se desconoce con certeza si la *Legionella pneumophila* está o no involucrada allí. Su detección es una gran incertidumbre, ya que esto no representa un tema de constante investigación, teniendo en cuenta que se requiere el uso de medios de cultivo especiales y poco convencionales para llevar a cabo el aislamiento e identificación de la especie.

Una de las razones por las que la *Legionella pneumophila* es relevante es porque esta bacteria se ha visto involucrada en el deterioro de la condición respiratoria del ser humano de una forma más rápida que los demás gérmenes comunes en pacientes diagnosticados con neumonía.

En Colombia, la incidencia de neumonía por *Legionella pneumophila* no ha logrado caracterizarse como nativa, teniendo en cuenta que los casos presentados se han encontrado en otros países y su información es limitada. Sin embargo, la neumonía adquirida en la comunidad (NAC) es considerada como la sexta causa de muerte y la primera por infección pulmonar, siendo responsable de aproximadamente el 4 % de los egresos al sector hospitalario: se puede afirmar que la tasa de morbilidad es de 13 por cada 10.000 habitantes de población general, a partir de datos de la Asociación Colombiana de Neumología y Cirugía de Tórax (ACNCT) (Castillo Villar, 2012).

LEGIONELLA PNEUMOPHILA

La *Legionella pneumophila* es un microorganismo gram-negativo aerobio, que generalmente presenta forma de bacilo; éste tiene movilidad gracias a la presencia de uno o más flagelos, no posee formas de resistencia (esporas) y regularmente mide de 0,5 a 1 μm de ancho y de 2 a 4 μm de longitud (Salvador García, 2011).

Una de las características principales de esta bacteria es su mecanismo de supervivencia, dado que la presencia de amebas favorece su crecimiento y proliferación en determinados ambientes e instalaciones de conducción hídrica, prevaleciendo a temperaturas tibias y condiciones ambientales de difícil acceso (Razón Behar, Tamargo Martínez, De Armas Morales & Cantillo Games, 2002). Dicha condición le aporta resistencia en su

hábitat natural, ya que se logra multiplicar en el interior de diversos protozoos de vida libre, así como también en complejas biocapas microbianas que se encuentran en el medio (Martín Redondo, 2016).

Enfermedades producidas por *Legionella pneumophila*

- **Fiebre de Pontiac.** Proceso epidémico de gravedad leve y autolimitado, con síntomas muy similares a una gripe convencional, como fiebre alta, artromialgias y afectación general del organismo (Vaqué Rafart & Martínez Gómez, 2002). Se trata de una infección cuyas secuelas no afectan significativamente al sistema pulmonar humano, y se podría relacionar más como una reacción al antígeno inhalado que como una intrusión bacteriana (Cuaspué Baño, 2018).
- **Legionelosis.** Afectación bacteriana de origen ambiental causada por la presencia de *Legionella pneumophila*. Consiste en un síndrome de neumonía grave, que puede ir desde presentar síntomas leves hasta insuficiencia respiratoria y muerte (Vilaseca i Vallvé, 2004). Los brotes de legionelosis son esporádicos y atípicos, originados ya sea por medios nosocomiales o comunitarios, que desencadenan condiciones de mortalidad especialmente en personas de edad avanzada o con enfermedades subyacentes (Jiménez Zabala et al., 2013).

METODOLOGÍA

Condiciones experimentales

Se realizaron en total treinta muestreos puntuales, diez para cada uno de los tres puntos definidos en la institución hospitalaria: urgencias, terapias respiratorias y duchas. Las muestras se tomaron durante los días 19 de octubre, 14 de noviembre, 22 de noviembre del año 2018 y 26 de febrero del año 2019.

Para la toma de muestras de agua se dispuso de botellas de vidrio de 250 ml previamente esterilizadas. La muestra de agua fue tomada del grifo para el caso del punto de muestreo de urgencias y terapias respiratorias, y de las duchas de baño utilizadas por los pacientes para el caso del punto de muestreo restante. El proceso de análisis en el laboratorio se realizó en un periodo menor de 12 horas, luego de haber recolectado las muestras.

Método de análisis: técnica de sustrato definido

La técnica de sustrato definido se basa en la tecnología de detección enzimática de bacterias, la cual indica la presencia del microorganismo en la muestra mediante el uso de un sustrato presente en un reactivo, para este caso el reactivo Legiolert. Este método se basa en que las células del microorganismo, *Legionella pneumophila*, crecen de forma rápida y su reproducción se ve beneficiada gracias al abundante aporte de aminoácidos, vitaminas y otros nutrientes proporcionados por el reactivo Legiolert, para este caso en particular. Las cepas de *Legionella pneumophila* en crecimiento activo utilizan el sustrato añadido para producir un indicador de color marrón (“Legiolert, para la detección de *Legionella pneumophila*”, 2018).

La prueba Legiolert puede usarse en dos tipos de agua: potable y no potable. En este caso, se implementó el protocolo para muestras de agua no potable aprobado por la Association Française de Normalisation (Afnor), considerando que las muestras de agua utilizadas corresponden a puntos de abastecimiento dentro de una institución hospitalaria, y que por sus condiciones no se usa para consumo humano.

RESULTADOS

Durante los tres muestreos se efectuaron mediciones de parámetros *in situ*, donde específicamente se estudió la relación de los parámetros físico-químicos (conductividad, pH, oxígeno disuelto, temperatura y cloro residual) con la presencia y cuantificación de *Legionella pneumophila* en tres puntos diferentes de una institución hospitalaria.

A continuación se muestran los resultados de la medición de dichos parámetros, realizada en tres puntos de muestreo durante tres fechas diferentes (tabla 1).

El proceso de detección de *Legionella pneumophila* se hizo a partir de la presencia/ausencia de color marrón o turbidez de cualquier intensidad observada en las bandejas de incubación (pocillos pequeños y pocillos grandes) para cada punto de muestreo, respectivamente.

Los resultados se expresan en número más probable por unidad de volumen, el cual se define como la densidad más probable de producir un resultado particular; en este caso, el volumen fue de 100 ml, por lo que los resultados se expresarán como NMP/100 ml.

Más adelante se presentan muestras del NMP/100 ml para cada punto de muestreo, durante las tres fechas seleccionadas para la toma de muestras (tabla 2).

Tabla 1
Resultados de medición de parámetros *in situ*

Fecha	Punto de muestreo	Parámetros					
		Conductividad (ms/cm)	T (°C)	Oxígeno disuelto (mg/L)	T (°C)	pH	T (°C)
19/10/2018	Urgencias	441	20,4	7,01	20,1	7,02	19,6
	Duchas	450	19,1	7,12	19,2	7,04	17,9
	Terapia respiratoria	422	18,8	7,03	18,7	7,02	18,8
14/11/2018	Urgencias	115,1	21,3	7,2	21,6	7,02	21,7
	Duchas	112,7	19,5	7,25	19,7	7,4	19,8
	Terapia respiratoria	114,8	20,6	7,21	20,6	7,17	20,9
22/11/2018	Urgencias	122,3	22	7,09	21,6	7,5	22
	Duchas	133,4	21,2	7,06	20,9	7,29	20,8
	Terapia respiratoria	139,3	21	7,2	21	6,93	21,7

Tabla 2
 Cuento general del NMP/100 ml de microorganismos

Cuantificación del NMP/100 ml			
Fecha	Puntos de muestreo		
	Urgencias	Terapia respiratoria	Ducha de pacientes
19/10/2018	19,4	16,9	21,9
	10,6	22,3	13,8
	12,3	26,4	16,8
	*	*	19,4
14/11/2018	26,4	31	26,4
	31	26,4	36,1
	26,4	36,1	31
	36,1	*	*
22/11/2018	41,6	26,4	23,8
	30,5	24,6	31
	36,1	21,9	36,1
	*	26,4	*

* Réplica de muestra no realizada para la fecha establecida.

En nuestro estudio se logró determinar la presencia de *Legionella pneumophila* en los tres puntos de muestreo: servicio de urgencias, punto de terapia respiratoria y duchas de pacientes; la cuantificación de *Legionella pneumophila* mediante el NMP/100 ml permitió obtener valores que oscilan dentro de un rango de 10,6 NMP/100 ml y 41,6 NMP/100 ml.

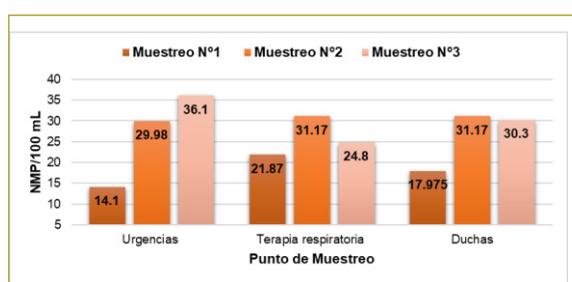


Figura 1. Promedio del NMP/100 ml en cada punto de muestreo.

En el punto de muestreo 1 hemos encontrado que la presencia de *Legionella pneumophila* es mayor durante el segundo y tercer día de muestreo, atribuyéndole esta tendencia principalmente a la temperatura registrada, ya que se encontraba dentro de un rango de 21 y 23 °C, que, aunque no son temperaturas óptimas de crecimiento de *Legionella pneumophila*, sí permiten que el crecimiento del microorganismo se establezca.

Para el punto de muestreo 2 se evidenciaron concentraciones de *Legionella pneumophila* similares a las encontradas en el punto de muestreo 1. En este punto, los valores de temperatura se comportan de manera estable a lo largo de los días, manejando unos rangos de temperatura de 20 y 22 °C, valores muy estables que favorecen la aparición de *Legionella pneumophila*.

En el punto de muestreo 3, el cual corresponde al punto de duchas utilizado por los pacientes para actividades de higiene personal, se encontró mayor presencia de *Legionella pneumophila*. Es importante mencionar que en este punto se cuenta con un sistema de duchas que garantizan niveles de temperatura por encima de los 20 °C, lo que permite que esta zona sea un medio ideal para el crecimiento y la supervivencia del microorganismo.

CONCLUSIONES

- La *Legionella pneumophila* es capaz de sobrevivir en ambientes extremos, lugares con déficit de limpieza, presencia de materia orgánica, altas temperaturas, zonas con incrustaciones de características corrosivas, presencia de otros microorganismos como barrera de protección y aporte de nutrientes necesarios en su crecimiento.
- La *Legionella pneumophila* se transmite principalmente por inhalación de aerosoles o dispersión de gotas de agua en el aire que se encuentren contaminadas por estancamiento hídrico o por contacto con agentes patógenos que contribuyen a su proceso de crecimiento.
- La implementación de la técnica de sustrato definido como método de detección de la *Legionella pneumophila* aporta ventajas significativas en procesos de investigación o aprendizaje, ya que es fácil, exacta y rápida, proporcionando resultados efectivos y sin pasos de confirmación adicional.
- Acorde con los resultados hallados en el conteo de la *Legionella pneumophila*, se obtuvo un promedio de 26 NMP/100 ml para el punto de muestreo en servicio de urgencias; en terapia respiratoria se logró un promedio de 25 NMP/100 ml, y para el punto de Duchas se obtuvo un promedio de 27 NMP/100 ml. Esto determina que la variación de dichos valores no es significativa, dado que no se observa mayor variación en el comportamiento de los parámetros *in situ* durante las tres fechas de muestreo.

- La implementación de medidas de prevención, tales como limpieza y mantenimiento periódico de depósitos de agua, revisión de las instalaciones con funcionamiento hídrico intermitente, análisis periódico de la calidad fisicoquímica del agua y mantenimiento de los sistemas de dispersión y dosificación de agua, de alguna manera constituyen acciones de vital importancia en el control y disminución de los efectos producidos por la *Legionella pneumophila*.

REFERENCIAS

- Arias Guzmán, J. A. (2016). *Neumonía atípica: importancia de la detección oportuna de Legionella pneumophila en Colombia. A propósito de un caso importado detectado en Bogotá en el año 2015*. Bogotá: Fundación Universitaria del Área Andina.
- Castillo Villar, A. M. (2012). *Presencia de Legionella penumophila en condensadores evaporativos y su relación con las características del agua*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Cuaspud Baño, L. E. (2018). *Detección de Legionella pneumophila en los sistemas de aerosoles producidos por las piezas ultrasónicas en la Clínica Integral de la Facultad de Odontología de la Universidad Central del Ecuador*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Herrera, P. (2020, enero). *Detección de Legionella pneumophila y su impacto en salud pública en el agua potable de un hospital municipal* (tesis de maestría). Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Jiménez Zabala, A., Santa Marina Rodríguez, L., Otazua Font, M., Cuetos, Y., Etxeberria Aguirresarobe, M., & De la Fuente Campos, K. (2013). Legionelosis esporádica: un problema sin resolver. *Revista de Salud Ambiental*, 13(1), 73–79.
- Legiolert, para la detección de *Legionella pneumophila* (2018). Retrieved September 9, 2019, from IDEXX Laboratories website: <https://www.idexx.es/es/water/water-products-services/legiolert>.
- Martín Redondo, Á. (2016). *Prevención y control de legionelosis en instalaciones de riesgo* (Universidad de Alcalá). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10017/26518>.
- Razón Behar, R., Tamargo Martínez, I., De Armas Morales, I., & Cantillo Games, H. (2002). Brote epidémico de neumonías por *Legionella pneumophila* en niños cubanos. *Revista Cubana de Pediatría*, 74(3), 203–207.
- Salvador García, C. (2011). *Legionella en redes de distribución de agua potable y torres de refrigeración en España*. Murcia: Universidad de Murcia.
- Vaqué Rafart, J., & Martínez Gómez, X. (2002). Salud pública: epidemiología de la legionelosis. *Medicina Integral: Medicina Preventiva y Asistencial en Atención Primaria de la Salud*, 40(6), 271–281.
- Vilaseca i Vallvé, M. (2004). La calidad del agua en el espacio público. Legionelosis. *Boletín Intexter del Instituto de Investigación Textil y de Cooperación Industrial*, (126), 55–60. Retrieved from www.raco.cat/index.php/Intexter/article/view/85596.

Tratamiento de agua residual proveniente del beneficio de conejos

Wastewater treatment coming from rabbit slaughter

DIANA MARCELA CARRILLO PARRA¹ - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental.

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

diana.carrillo-pa@mail.escuelaing.edu.co - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 26/09/2019 Aceptado: 170/10/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se muestra el diseño conceptual de tres opciones para el tratamiento de las aguas provenientes del proceso de beneficio de conejos de una empresa ubicada en El Rosal (Cundinamarca), de acuerdo con la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual. Así mismo, se presenta la opción seleccionada, compuesta por trampa de grasas, filtro anaeróbico de flujo ascendente y cloración, que permite reutilizar el agua tratada en riego de cultivos. Se espera que cumpla con las eficiencias de remoción requeridas por la norma, y con requerimientos de costo-beneficio (Carrillo, 2019).

Palabras claves: agua residual industrial, beneficio de conejos, tratamiento de agua residual.

Abstract

This paper shows the conceptual design of three alternatives for the treatment of wastewater from the rabbit slaughter process of a company located in the municipality of El Rosal (Cundinamarca), in accord with the physicochemical and microbiological characterization of wastewater.

The alternative selected consists of grease trap, up-flow anaerobic filter, and chlorination to allow the reuse of treated water in crop irrigation. The alternative meets the removal efficiency required by the standard and the cost-benefit requirements.

Keywords: industrial wastewater, rabbit slaughter, wastewater treatment.

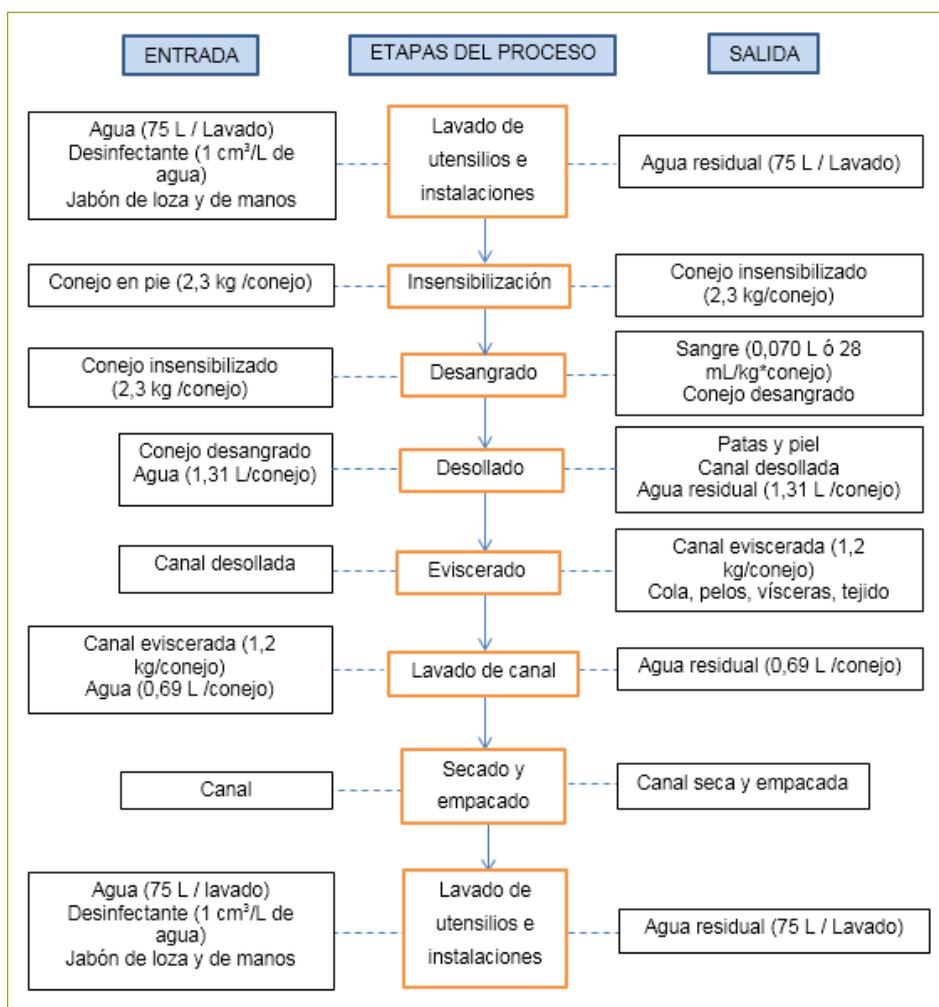
INTRODUCCIÓN

En Colombia, la cunicultura es un sector que ha ido creciendo lentamente pero que ha logrado encaminarse como un negocio rentable. Existen alrededor de 37.800 unidades productivas a escala nacional, con una cría promedio anual de 735.000 conejos, lo que lleva a una producción promedio al año de 1.000 toneladas de carne de conejo (Ministerio de Agricultura, 2018). No obstante, sólo existen siete plantas de beneficio autorizadas e inscritas vigentes a junio del 2019: dos en Antioquia, una en Bogotá, tres en Cundinamarca (Fusagasugá, Granada y La Calera) y una en el Valle del Cauca (Invima, 2019).

La carne de conejo es un alimento de gran nivel nutricional y saludable, ya que tiene un alto contenido proteico; además, para el levante de conejos no se utilizan elementos químicos ni hormonas. Por esto puede competir de igual a igual con otros procesos productivos que actualmente son las fuentes principales de proteínas en el país.

Dentro de la cunicultura se desarrolla la actividad de beneficio animal, la cual tiene potencial contaminante del recurso hídrico y del suelo, principalmente, ya que se producen impactos ambientales por el agotamiento del recurso, por la generación de residuos sólidos y por la descarga de efluentes con un elevado nivel de carga orgánica. Esto se debe al manejo deficiente de la recolección de la sangre, malas prácticas de lavado de vísceras y de las instalaciones, escaso aprovechamiento y reutilización de subproductos, ausencia de caracterización y control de los residuos líquidos generados, los cuales se descargan directamente sin ningún tratamiento a las fuentes hídricas o sobre el suelo.

Figura 1 Diagrama de flujo del proceso de beneficio de conejos.



Las aguas residuales de esta actividad pueden incluir trazas de heces y orina, sangre, pelusa, lavazas, residuos de carne y grasas de las canales, del suelo y de los utensilios, alimentos no digeridos por los intestinos y vísceras de los animales sacrificados. En efecto, el agua residual se caracteriza por contener altas cargas de DBO, DQO, patógenos, nitratos, sólidos suspendidos, grasas y aceites, las cuales requieren tratamiento y descarga final en vertederos aceptables.

EL PROCESO

La empresa en estudio es productora y comercializadora de carne de conejo y de subproductos cunícolas. La actividad de beneficio de conejos se realiza una vez por semana, con una duración de una hora, produciendo un volumen de agua residual de 0,21 m³. En promedio, en la planta se sacrifican 120 conejos al mes.

En la figura anterior se presenta el diagrama de flujo del proceso de beneficio de conejos evaluado (figura 1).

Todos los residuos sólidos y subproductos que se generan en el proceso son reutilizables, por lo que le procuran un valor económico a la empresa. Algunos se usan en el proceso de compostaje para obtener conejaza, en tanto que otros se comercializan para procesamiento como concentrado de animales o para alimento de animales en zoológicos.

Las aguas residuales son generadas durante el lavado de utensilios e instalaciones, y en las etapas de desollado y lavado de canal. Estas aguas pasan por una rejilla para retención de sólidos gruesos, y son conducidas luego por tubería hasta seis metros fuera de la planta de beneficio, haciendo vertimiento al suelo sin ningún tratamiento previo. Más adelante se ilustra la generación de aguas residuales en el proceso, así como las condiciones de su descarga (figura 2).

Caracterización del agua residual cruda

A continuación se presenta la caracterización fisicoquímica y microbiológica del agua residual cruda generada



Figura 2. Generación y vertimiento de aguas residuales.

en el beneficio de conejos de la empresa en estudio. La muestra de agua residual tomada corresponde al sacrificio de 30 conejos (tabla 1).

REQUISITOS DE TRATAMIENTO

En las tablas siguientes se presentan las eficiencias requeridas del tratamiento para vertimiento puntual de las aguas residuales a un cuerpo de agua superficial (artículo 15 de la Resolución 631 de 2015); para el reu-

Tabla 1
Caracterización del agua residual cruda

Parámetro	Unidades	Resultado	Método
Aceites y grasas	mg/L	304	SM 5520 B
Acidez total	mg/L - CaCO ₃	< 5	SM 2310 B
Alcalinidad total	mg/L - CaCO ₃	204	SM 2320 B
Cloruros	mg/L - Cl ⁻	29	SM 4500-CL- B
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	4,1 x 10 ⁵	SM 9223
DBO	mg/L - O ₂	929	SM 5210 B
DQO	mg/L - O ₂	1811	SM 5220 D
Detergentes	mg/L	3,3	SM 5540 C
Calcio	mg/L -CaCO ₃	20	SM 3500-CA B
Dureza total	mg/L -CaCO ₃	21	SM 2340 C
Fósforo total	mg/L . P	1,7	SM 4500-P B,D
Nitratos	mg/L - N	47	SM 4500 NO ₃ - B
Nitritos	mg/L - N	< 0,01	SM 4500 NO ₂ - B
Nitrógeno amoniacal	mg/L - N	< 0,1	SM 4500-NH3 B,F
NTK	mg/L - N	< 0,5	SM 450
Ortofosfatos	mg/L - PO ₄ ³⁻	3,8	SM 4500 P D
pH	Unidades	7,44	SM 4500-H + B
Sólidos sedimentables	mL/L	<0,1	SM 2540 F
Sólidos suspendidos totales	mg/L	73,8	SM 2540 D
Sulfatos	mg/L	126	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E

so de las aguas residuales tratadas en riego agrícola (artículo 7 de la Resolución 1207 de 2014), y para el reúso en la descarga de aparatos sanitarios (artículo 7 de la Resolución 1207 de 2014) (tablas 2-4).

de una PTAR en cochada para caudal de 210 L por proceso, en descarga de un periodo de 1 hora, que se realiza cada 8 días.

OPCIONES DE TRATAMIENTO

Teniendo en cuenta la operación de beneficio de conejos en la planta de estudio, se debe considerar la dotación

Opción 1: Laguna facultativa

Incluye trampa de grasas y laguna facultativa, para realizar descarga a un cuerpo de agua superficial (figura 3). El costo global estimado del proyecto es \$4.896.000.

Tabla 2
Eficiencias requeridas para vertimiento a cuerpo de agua superficial

Parámetro	Unidades	Concentración del agua residual	Res. 631/2015 Art. 15		Eficiencia requerida % Remoción
			Límite Máx.	Cumple	
Aceites y grasas	mg/L	304	10	No	97
Cloruros	mg/L - Cl ⁻	29	250	Sí	-
DBO	mg/L - O ₂	929	50	No	95
DQO	mg/L - O ₂	1811	150	No	92
pH	Unidades	7,44	6,0 -9,0	Sí	-
Sólidos sedimentables	ml/L	<0,1	1	Sí	-
Sólidos suspendidos totales	mg/L	73,8	50	No	32
Sulfatos	mg/L	126	250	Sí	-

Tabla 3
Eficiencias requeridas para reúso en riego

Parámetro	Unidades	Concentración del agua residual	Res. 1207/2014 Art. 7 (Uso agrícola)		Eficiencia requerida (%) Remoción
			Límite Máx.	Cumple	
Cloruros	mg/L - Cl ⁻	29	300	Sí	-
Coliformes termotolerantes	NMP/100 mL	4,1 x 10 ⁵	1 x 10 ⁵	No	76
Nitratos	mg/L - N	47	5	No	89
pH	Unidades	7,44	6,0 - 9,0	Sí	-
Sulfatos	mg/L	126	500	Sí	-

Tabla 4
Eficiencias requeridas para reúso en descarga de aparatos sanitarios

Parámetro	Unidades	Concentración del agua residual	Res. 1207/2014 Art. 7 (Descarga de aparatos sanitarios)		Eficiencia requerida (%) Remoción
			Límite máx.	Cumple	
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	4,1 x 10 ⁵	1 x 10 ⁴	No	97,5
pH	Unidades	7,44	6,0 - 9,0	Si	-

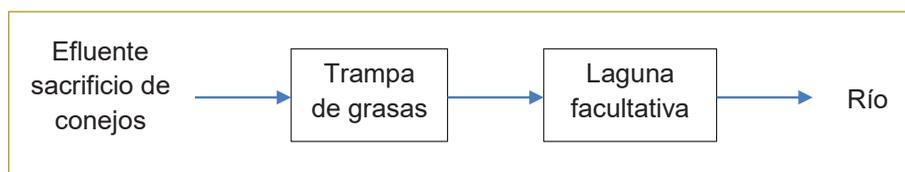


Figura 3. Diagrama de flujo (opción 1).

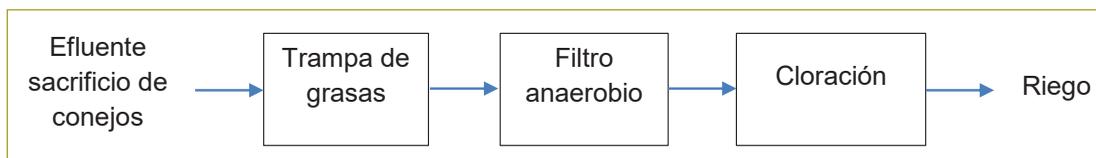


Figura 4. Diagrama de flujo (opción 2).



Figura 5. Diagrama de flujo (opción 3).

Opción 2: Filtro anaerobio y cloración

Incluye trampa de grasas, un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) y cloración, para realizar riego a cultivos de pastos y forrajes para consumo animal (figura 4). El costo global estimado del proyecto es \$1.074.378.

Opción 3: Cloración

Incluye un tanque de contacto para desinfección con tolva para sedimentación de lodos, para realizar descarga en aparatos sanitarios (figura 5). El costo global estimado del proyecto es \$578.000.

Evaluación de opciones

Posteriormente, se presenta el resumen de las tres opciones, teniendo en cuenta el costo global del proyecto, eficiencia de remoción de los parámetros y cumplimiento de la normativa existente (tabla 5).

De acuerdo con los datos que aparecen en la tabla citada, la opción 3 es la más adecuada para tratar el agua residual proveniente del beneficio de conejos, por costo. Sin embargo, teniendo en cuenta que el caudal disponible es intermitente y no garantiza el abastecimiento seguro del agua requerida para descarga de los aparatos sanitarios, para la empresa es recomendable adoptar la opción 2.

Tabla 5
Evaluación de opciones para el sistema de tratamiento

Condición	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Costo global	\$4.896.000	\$1.074.378	\$578.000
Eficiencia del sistema en DBO	95 %	94 %	40 %
Eficiencia del sistema en CT	90 %	100 %	100 %
Cumplimiento de la norma	SI	SI	SI
Destino	Agua superficial	Uso agrícola	Descarga de aparatos sanitarios

CONCLUSIONES

- Para disminuir la concentración de DBO y sólidos suspendidos totales (SST) en el efluente, la empresa debe recolectar en seco los residuos sólidos caídos al piso durante el beneficio, colocando un anejo metálico por debajo de la rejilla de drenaje existente para retener los residuos de menor tamaño que puedan escapar al barrido en seco, así como también hacer el desangrado dentro de la caneca de desangre, evitando que se vierta la sangre al desagüe.
- Es necesario controlar la dosificación de cloro para la desinfección de utensilios e instalaciones, con el fin de evitar el exceso de cloruros en el efluente.
- Las características objetables del agua residual proveniente del beneficio de conejos son DBO, DQO, grasas y aceites, coliformes termotolerantes, nitratos y sólidos suspendidos.
- Las eficiencias de remoción requeridas para la descarga a cuerpo superficial de agua son 97 % para grasas y aceites, 95 % para DBO, 92 % para DQO y 32 % para sólidos suspendidos.
- Las eficiencias de remoción requeridas para reúso en riego son 76 % para coliformes termotolerantes y 89 % para nitratos.
- La eficiencia de remoción requerida para la descarga de aparatos sanitarios es de 98 % para coliformes termotolerantes.

- El proceso con trampa de grasas, filtro anaerobio de flujo ascendente y cloración se considera el más recomendable para el tratamiento de las aguas residuales evaluadas y para el reúso del agua tratada en riego de cultivos de pastos y forrajes para consumo animal, cuyo costo global es de \$1.074.378, aproximadamente.

REFERENCIAS

- Carrillo, D. (2019). *Tratamiento de agua residual de beneficio de conejos* (tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito). Bogotá.
- Invima (2019). *Plantas de beneficio y desposte de ovinos y caprinos, conejos, equinos y avestruces autorizadas e inscritas ante el Invima*. Recuperado de <https://www.invima.gov.co/documents/20143/426809/PLANTAS-DE-BENEFICIO-Y-DESPOSTE-DE-EQUINOS-OVINOS-CONEJOS-Y-AVESTRUCE-INSCRITAS-A-MAYO-2019.pdf/165e0454-b928-1497-9119-442336809f6b?t=1559844358074>, 23 de agosto de 2019.
- Resolución 1207 de 2014, por la cual se adoptan disposiciones con el uso de aguas residuales tratadas. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia.
- Resolución 0631 de 2015, por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Colombia.

Determinación de factores de resistencia para cimentaciones superficiales y profundas en Bogotá, D.C.

Determination of resistance for surface and deep foundations in Bogota, D.C.

YUDY ESLEYDI VANEGAS AGUIRRE¹ - CARLOS EDUARDO RODRÍGUEZ PINEDA²

1. Magíster en Ingeniería Civil.

2. Profesor de cátedra de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

yudy.vanegas@mail.escuelaing.edu.co - crodriguezp@javeriana.edu.co

Recibido: 02/10/2019 Aceptado: 22/10/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se desarrolla la obtención de factores de resistencia a nivel local (Bogotá, D.C.) para cimentaciones superficiales y profundas, partiendo del análisis estadístico de parámetros de resistencia obtenidos de diferentes tipos de ensayos, para establecer su distribución y posteriormente realizar el análisis probabilístico, mediante el método de Montecarlo de la capacidad portante o resistencia, y establecer la distribución y parámetros estadísticos de ésta, para luego aplicar el análisis de confiabilidad mediante el método LRFD mencionado en la norma AASHTO 2012 y en la norma CCP14 aplicada en Colombia desde el año 2015.

Así mismo, se exponen las variables que influyen en los factores de resistencia y la variabilidad de los factores de resistencia con respecto a cada una de ellas, y se presentan factores de resistencia obtenidos para suelos cohesivos y granulares en el ámbito local.

Palabras claves: factores de resistencia, LRFD, ASD, estado límite de resistencia, cimentaciones superficiales, cimentaciones profundas, factores de carga.

Abstract

This paper develops the estimation of resistance factors at the local level (Bogotá DC), for surface and deep foundations, based on the statistical analysis of resistance parameters to establish their distribution and subsequently perform the probabilistic analysis using the Monte-carlo method of bearing capacity or resistance and establishing their distribution and statistical parameters, and then applying the reliability analysis using the LRFD method mentioned in the AASHTO 2012 standard and in the CCP14 standard applied in Colombia since 2015. In this document, an exposition of the variables that influence the resistance factors and the variability of the resistance factors regarding each of them is presented, and resistance factors obtained for cohesive and granular soils at the local level are presented.

Keywords: resistance factors, LRFD, ASD, limit state of resistance, surface foundations, deep foundations, load factors.

INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Bogotá no se cuenta con factores de resistencia a nivel local, factores determinados para las condiciones de exploración, ensayos y características propias de los suelos existentes en la ciudad; por tal razón, en aspectos geotécnicos no se suelen incluir los factores de resistencia en los diseños geotécnicos.

Por otra parte, la normativa aplicable para el país en lo referente a edificaciones es la NSR-10, la cual no presenta factores de resistencia para aspectos geotécnicos, sino factores de seguridad directos (factor de seguridad aplicado a los parámetros del suelo) e indirectos (factor de seguridad global). En el año 2015 se adoptó en el país el Código Colombiano de Puentes (CCP-14), el cual presenta los factores de carga y resistencia establecidos en la norma AASHTO (2012). En Colombia, su uso es limitado al diseño y construcción de puentes.

Dados los avances en el ámbito internacional y la inclusión de análisis de confiabilidad en toda clase de diseños ingenieriles, es importante contar con mejores aproximaciones en los factores utilizados para la optimización de los diseños, por lo que surge la necesidad de contar con factores de resistencia a escala local.

A partir de lo mencionado en el párrafo anterior, desde el punto de vista geotécnico se hace necesario cuestionarnos sobre lo siguiente:

- ¿Cómo varían los valores de los factores de resistencia en cimentaciones superficiales y profundas, dependiendo de las características propias de los suelos existentes a escala local?
- Teniendo en cuenta la variabilidad en los tipos de suelo de un lugar a otro y los métodos de exploración usados para la obtención de parámetros de resistencia a utilizarse en diseños geotécnicos de cimentaciones, ¿los factores de resistencia del código CCP14 son aplicables en el ámbito local?

Con base en los cuestionamientos realizados, en este artículo se presentan los resultados de factores de resistencia para cimentaciones superficiales y profundas, tomando en cuenta las características propias de los suelos que se presentan a escala local (Bogotá, D.C.), partiendo del análisis de confiabilidad mediante el método LRFD presentado en la norma CCP14; a la vez, se establece la variación de los factores de resistencia a partir de parámetros de resistencia obtenidos de ensayos

de campo y de laboratorio, así como mediante el uso de correlaciones. Finalmente, se comparan los factores de resistencia que se presentan en el ámbito local con los que aparecen en el Código Colombiano de Puentes (CCP-14) y se establece la aplicabilidad de los factores de resistencia presentados en el CCP-14, tomando en cuenta los resultados obtenidos.

A lo largo de este artículo se tratan los temas referentes a definición de factor de resistencia, estados límites de diseño, metodología para la determinación de factores de resistencia, métodos para la determinación de factores de resistencia, parámetros de resistencia y análisis estadístico, resistencia o capacidad portante y análisis estadístico, factores de carga y cargas, resultados de factores de resistencia, trabajos futuros de investigación y conclusiones.

DEFINICIÓN DE FACTOR DE RESISTENCIA

Los factores de resistencia son factores de reducción que se aplican a la capacidad portante o resistencia de una cimentación; su importancia radica en que son desarrollados con un enfoque de confiabilidad, e implícitamente en ellos está incluida la incertidumbre de los diferentes parámetros que se usan en el diseño, diferenciándose de esta manera de los factores de seguridad comúnmente utilizados.

ESTADOS LÍMITES

Estado límite de resistencia

A partir de lo expuesto en la AASHTO (2012), “El diseño de cimentaciones por estado límite de resistencia debe incluir la resistencia estructural de los elementos de cimentación y la resistencia geotécnica nominal. El diseño por estado límite de resistencia no debe considerar las deformaciones requeridas para movilizar la resistencia nominal, sino únicamente una definición de la falla, basada específicamente en las deformaciones”.

Estado límite de servicio

“Los estados límites de servicio son aquellos que, de ser excedidos, pueden dar lugar a la pérdida de funcionalidad para la que la estructura fue proyectada, aunque ello no lleve a un fallo inminente de la misma” (VI Congreso ACHE, 2014).

De acuerdo con la AASHTO (2012), para el diseño de cimentaciones por estado límite de servicio se deben incluir asentamientos, movimientos horizontales y estabilidad general.

Estado límite por evento extremo

El estado límite por evento extremo es el que toma en cuenta las cargas sísmicas y los niveles de agua superiores a los actuales, como sucede en el caso de inundación.

MÉTODOS PARA LA DETERMINACIÓN DE FACTORES DE RESISTENCIA

ASD

Según Baecher y Cristhian (2003), “El método ASD combina la incertidumbre en las cargas y la resistencia del suelo (o deformación) en un factor de seguridad, *FS*”, de manera que:

$$\frac{R}{FS} = \sum Qi$$

LRFD

En el método LRFD el factor de carga, γ , es asignado a la variabilidad o incertidumbre en las cargas, mientras

que un factor de resistencia ϕ es asignado a la variabilidad o incertidumbre en la resistencia. Así, en LRFD la comparación de carga y resistencia es formulada por el estado límite de resistencia en la ecuación de la siguiente forma (Withiam et al., 1997):

$$Rr = \phi Rn \geq \eta \sum \gamma_i Q_i$$

Donde:

Rr: resistencia última.

Rn: resistencia nominal.

Φ : factor de resistencia.

γ_i : factor de carga.

Qi: cargas

η : factor adimensional (tomado del código estructural) que tiene en cuenta los efectos de ductilidad (η_D), redundancia (η_R) e importancia operacional (η_I), $\eta = \eta_D \eta_R \eta_I > 0,95$.

ASD a partir de LRFD

Remplazando la resistencia última de ASD en la ecuación de la LRFD, se obtiene lo siguiente:

$$\phi Fs \sum Qi \geq \eta \sum \gamma_i Q_i$$

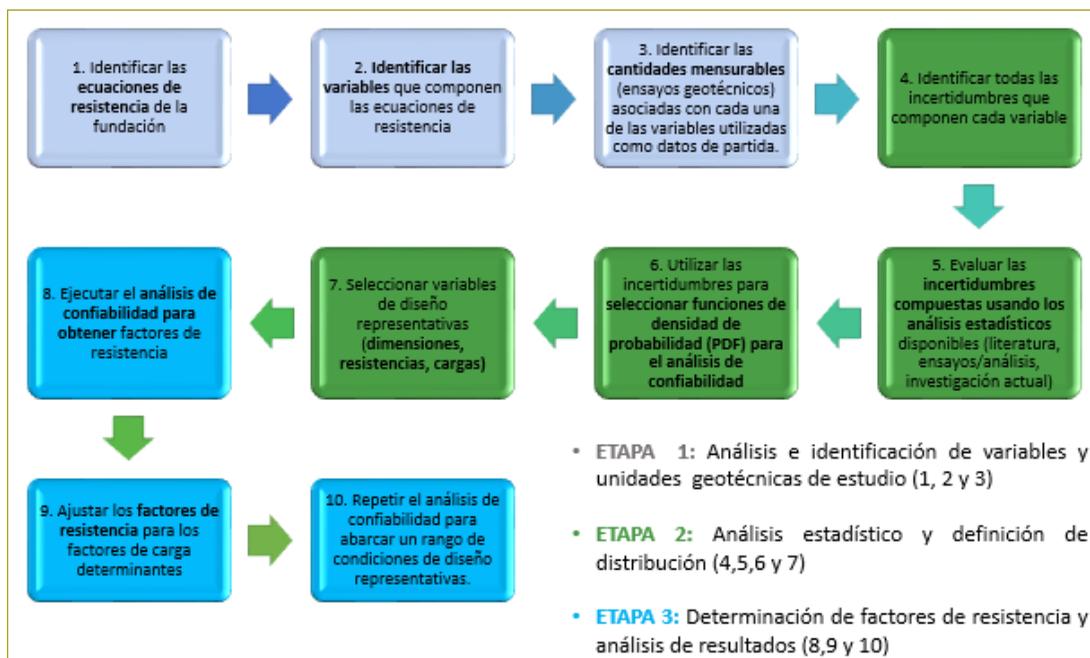


Figura 1. Metodología para la determinación de factores de resistencia.

Fuente: Elaboración propia, con base en información de Foye, Jaoudoe y Salgado (2004).

La ecuación del método ASD, en términos de la relación Q_D/Q_L (O'Neil, 1995), corresponde a lo presentado en la siguiente ecuación.

$$\phi = \frac{\gamma_D Q_D + \gamma_L Q_L}{F_s \left(\frac{Q_D}{Q_L} + 1 \right)}$$

Factores de resistencia a partir de FOSM

Según Baecher y Cristhian (2003), la resistencia nominal está definida como la relación entre el valor esperado de resistencia o valor medio de la resistencia y el sesgo de la resistencia, como se presenta en la siguiente ecuación:

$$R_n = \frac{E[R]}{\lambda_R}$$

Donde:

$E[R]$ o μ_R : valor de resistencia esperado o media de la resistencia.

λ_R : sesgo de la resistencia.

Ignorando en la ecuación LRFD la corrección por el término η , el factor de resistencia que satisface la desigualdad es:

$$\phi_R \geq \left(\frac{\lambda_R}{E[R]} \right) \sum \gamma_i Q_i$$

El factor de resistencia según el método LRFD depende del tipo de distribución de probabilidad tanto de las cargas como de la resistencia del suelo.

- Distribución normal

De acuerdo con Baecher y Cristhian (2003), el margen de seguridad, M , es la diferencia entre la resistencia y la carga; este margen para una distribución normal está dado por la siguiente ecuación:

$$M = R - Q$$

Partiendo de la ecuación de margen de seguridad y suponiendo que las cargas y la resistencia no están co-

rrrelacionadas, se establece la ecuación que se presenta a continuación:

$$\phi_R = \left(\frac{\lambda_R (\gamma_D Q_D + \gamma_L Q_L)}{(\lambda_{QD} Q_D + \lambda_{QL} Q_L) + \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \right)$$

Donde:

$\lambda_D, \lambda_{QD}, \lambda_{QL}$: sesgo de la resistencia, de la carga muerta y de la carga viva.

Q_L, Q_D : carga muerta y carga viva.

γ_L, γ_D : factor de carga viva y carga muerta.

Según Arias (2015), el factor de resistencia para una distribución normal en términos de la relación Q_D/Q_L se expresa como se presenta a continuación:

$$\phi_R = \left(\frac{\lambda_R \left(\gamma_D \left(\frac{Q_D}{Q_L} \right) + \gamma_L \right)}{\left(\lambda_{QD} \frac{Q_D}{Q_L} + \lambda_{QL} \right) + \frac{\beta \left(\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2} \right)}{Q_L}} \right)$$

- Distribución lognormal

A juicio de Baecher y Cristhian (2003), cuando las cargas y la resistencia presentan una distribución lognormal, se tiene lo siguiente

$$g(R, Q) = \ln R - \ln Q = 0$$

Con base en lo presentado de la función que relaciona la distribución de la carga y la resistencia, se tiene que el factor de resistencia para una distribución lognormal está dado por la siguiente ecuación:

$$\phi_R = \left(\frac{\lambda_R \left(\sum \gamma_i Q_i \right) \sqrt{\frac{(1 + \text{COV}(Q)^2)}{1 + \text{COV}(R)^2)}}}{E(Q) + \exp \left\{ \beta \sqrt{\ln[(1 + \text{COV}(R)^2) + (1 + \text{COV}(Q)^2)]} \right\}} \right)$$

λ_R, λ_Q : sesgo de la resistencia y sesgo de la carga.

$E(Q)$: valor medio de la carga.

$\text{COV}(Q), \text{COV}(R)$: coeficiente de variación de la carga y la resistencia.

γ_i : factores de carga.
 β : índice de confiabilidad.

Dejando la ecuación anterior en términos de carga muerta y carga viva, se tiene lo siguiente:

$$\phi_R = \frac{\lambda_R \left(\frac{\gamma_D E(Q_D)}{E(Q_L)} + \gamma_L \right) \sqrt{\frac{(1 + COV(Q)^2)}{(1 + COV(R)^2)}}}{\left(\frac{\lambda_{QD} E(Q_D)}{E(Q_L)} + \lambda_{QL} \right) + \exp \left\{ \beta \sqrt{\ln[(1 + COV(R)^2) + (1 + COV(Q_D)^2) + (1 + COV(Q_L)^2)]} \right\}}$$

PARÁMETROS DE RESISTENCIA Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Mediante el análisis estadístico de parámetros de resistencia obtenidos de resultados de ensayos de labora-

torio (compresión, corte directo y triaxial), y ensayos de campo de SPT y CPT, se estableció la distribución (normal o lognormal) a la que mejor se ajustan los datos de cada una de las variables geotécnicas que se utilizan posteriormente en el cálculo de capacidad portante.

El grado de ajuste de los datos a un tipo de distribución se evalúa mediante el *software* Risk, con la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov para variables aleatorias continuas, la cual arroja como resultado el valor *p*. Dicho valor corresponde al nivel de significancia más bajo en el que el valor del estadístico de prueba es más significativo. Así, al utilizar un nivel de confianza del 95 % el valor *p* debe ser menor que el 5 % para poder afirmar que los datos se ajustan a una determinada distribución, siendo la anterior afirmación la hipótesis nula.

En el análisis estadístico se considera importante tomar en cuenta la existencia de *outliers* o valores atípicos dentro de la muestra de datos.

Análisis estadístico de parámetros de ensayos de laboratorio

Tabla 1
 Resultados del análisis estadístico del peso unitario

Unidad geotécnica	Tipo de muestra	Peso unitario (KN/m ³)								
		N.º de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de distribución	Valor <i>p</i> %	Sesgo
Qtb11	MI	11	16,00	21,90	19,60	0,96	0,05	Lognormal	95,48	0,99
Qtb12	MI	13	16,88	22	19,5	1,3	0,07	Normal	95,81	1,00
Qtb13	MI	10	18	21	19,49	1,01	0,05	Normal	99,86	1,00
Qtb21	SH	64	14,5	21	18,15	1,42	0,08	Lognormal	99,17	0,99
Qtb22	SH	88	13,8	23	18,08	1,84	0,10	Normal	48,93	0,99
Qtb23	SH	30	14	21	18,61	1,94	0,10	Normal	83,64	0,98
Qcc11	MI	10	17,7	20,68	19,52	0,73	0,04	Normal	98,62	0,99
Qcc12	MI	18	17,3	23,9	20,79	1,38	0,07	Normal	99,99	1,00
Qcc13	MI	13	18,04	23,21	20,52	1,5	0,07	Lognormal	99,78	1,00
Qcc21	SH	41	12,64	24,72	18,49	2,39	0,13	Normal	89,63	0,99
Qcc22	SH	56	12,3	24,7	17,98	1,86	0,10	Normal	99,93	1,00
Qcc23	SH	37	14,1	24,6	19,56	1,92	0,10	Normal	98,15	1,00
Qta21	SH	136	11,8	20,24	14,74	2	0,14	Lognormal	0,67	1,02
Qta22	SH	31	12,5	20,69	14,88	1,8	0,12	Lognormal	92,29	1,01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2
Resultados del análisis estadístico del índice de plasticidad

Unidad geotécnica	Tipo de muestra	Índice de plasticidad								
		N.º de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de distribución	Valor p %	Sesgo
Qtb11	SPT	25	3	22	9,00	4,71	0,52	Normal	93,56	1,04
Qtb12	SPT	38	3	19	8,77	5,13	0,58	Lognormal	87,81	0,96
Qtb13	SPT	30	2,81	14	6,19	2,81	0,45	Lognormal	84,71	1,04
Qtb21	SH	93	7	127	37,51	33,08	0,88	Lognormal	44,20	1,00
Qtb22	SH	100	0,93	74	25,59	15,22	0,59	Lognormal	51,52	1,03
Qtb23	SH	45	4,32	42,92	19,79	6,97	0,35	Lognormal	95,79	0,99
Qcc11	SPT	33	4	17,66	10,53	4,09	0,39	Lognormal	83,00	0,96
Qcc12	SPT	64	1,48	19	9,83	4,17	0,42	Lognormal	87,30	1,01
Qcc13	SPT	56	3	19	10,07	3,79	0,38	Normal	97,08	1,02
Qcc21	SH	56	6,46	83,6	25,37	13,58	0,54	Lognormal	99,73	1,03
Qcc22	SH	74	0,13	47	22,02	10,96	0,50	Lognormal	96,22	0,97
Qcc23	SH	45	0,79	45	20,63	5,84	0,28	Normal	99,63	1,00
Qta21	SH	196	0,13	21,9	76,23	40,62	0,53	Normal	19,51	1,01
Qta22	SH	44	11	139	73,54	32,36	0,44	Normal	99,09	1,01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Resultados análisis estadístico de parámetros obtenidos de la compresión inconfiada

Unidad geotécnica	Tipo de muestra	Su a partir de compresión inconfiada (KN/m ²)								
		N.º de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de distribución	Valor p %	Sesgo
Qtb21	SH	53,00	14,22	82,89	40,71	18,15	0,45	Normal	98,23	1,02
Qtb22	SH	69,00	19,13	132,44	61,31	24,53	0,40	Normal	99,90	1,01
Qtb23	SH	23,00	18,15	179,03	71,12	38,26	0,54	Lognormal	100,00	1,03
Qcc21	SH	27,00	3,43	60,82	19,62	10,79	0,55	Normal	95,83	1,08
Qcc22	SH	32,00	8,34	74,07	35,32	19,13	0,54	Normal	98,91	1,03
Qcc23	SH	26,00	6,38	123,61	58,37	39,73	0,68	Normal	96,11	0,98
Qta21	SH	56,00	1,96	44,15	14,72	9,81	0,67	Normal	71,71	1,03
Qta22	SH	17,00	2,94	26,98	11,77	6,87	0,58	Normal	96,48	1,08

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4
Resultados análisis estadístico corte directo - cohesión

Unidad geotécnica	Tipo de muestra	Corte directo C (KN/m ²)								
		N.º de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de distribución	Valor p %	Sesgo
Qtb21	SH	4	30,41	49,05	43,16	6,87	0,16	Normal	97,36	0,98
Qcc21	SH	4	23,54	42,18	35,32	8,83	0,25	Normal	98,28	1,00
Qcc23	MP	7	12,75	26,49	17,66	4,91	0,28	Normal	99,05	1,06
Qta21	SH	56	3,92	88,29	29,43	19,62	0,67	Normal	71,71	1,03

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5
Resultados análisis estadístico corte directo - ángulo de fricción

Unidad geotécnica	Tipo de muestra	Corte directo ϕ								
		N.º de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de distribución	Valor p %	Sesgo
Qtb21	SH	4	17,87	24,25	20,22	2,86	0,14	Lognormal	98,48	1,01
Qcc21	SH	5	17,08	26,77	22,22	4,81	0,22	Normal	99,53	1,00
Qcc23	MP	9	18,52	38,61	26,23	7,14	0,27	Lognormal	99,85	1,01
Qta21	SH	14	10,86	20,33	16,34	2,51	0,15	Normal	99,75	0,99

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6
Resultados análisis estadístico triaxiales efectivos - cohesión

Unidad geotécnica	Tipo de muestra	Triaxiales efectivos $C(KN/m^2)$								
		N.º de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de distribución	Valor p %	Sesgo
Qtb21	SH	4	0,00	122,63	69,65	52,97	0,76	Normal	99,99	0,96
Qtb22	SH	4	70,63	137,34	89,27	31,39	0,35	Normal	88,58	1,02
Qtb23	SH	5	0,00	97,12	59,84	43,16	0,72	Lognormal	97,67	0,92
Qcc21	MI	5	14,72	106,93	72,59	34,34	0,47	Normal	99,59	0,92
Qcc22	SH	13	0,00	134,40	73,58	51,99	0,71	Normal	98,65	0,92
Qcc23	MI	8	0,00	167,75	62,78	57,88	0,92	Normal	99,47	1,05
Qta21	SH	16	0,00	127,53	41,20	31,39	0,76	Normal	99,79	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7
Resultados análisis estadístico triaxiales efectivos - ángulo de fricción

Unidad geotécnica	Tipo de muestra	Triaxiales efectivos ϕ								
		N.º de datos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de distribución	Valor p %	Sesgo
Qtb21	SH	4	15,20	32,14	26,79	5,86	0,22	Normal	96,90	0,95
Qtb22	SH	4	18,38	29,03	22,02	4,96	0,23	Lognormal	94,54	1,00
Qtb23	SH	5	10,00	33,84	22,79	11,44	0,50	Normal	98,05	0,96
Qcc21	MI	5	13,60	30,18	18,34	6,22	0,34	Lognormal	97,85	1,00
Qcc22	SH	11	13,00	31,90	23,95	3,46	0,14	Normal	96,94	0,98
Qcc23	MI	8	13,00	28,30	22,35	7,03	0,31	Normal	87,26	0,99
Qta21	SH	17	5,01	29,00	17,61	6,68	0,38	Lognormal	99,96	0,97

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8
Resultados análisis estadístico triaxiales totales - cohesión

Unidad geotécnica	Tipo de muestra	N.º de datos	Triaxiales totales C(KN/m ²)							
			Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Tipo de distribución	Valor ρ %	Sesgo
Qtb22	SH	4	59,84	107,91	73,58	21,58	0,29	Normal	91,66	1,04
Qcc21	MI	5	10,30	128,51	54,94	46,11	0,84	Normal	99,57	1,11
Qcc22	SH	6	0,00	161,87	82,40	55,92	0,68	Normal	99,59	1,00
Qcc23	MI	4	0,00	194,24	122,63	79,46	0,65	Normal	99,58	0,90
Qta21	SH	11	0,00	101,04	30,41	33,35	1,00	Normal	52,44	1,16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9
Rangos de datos estadísticos de parámetros de ensayos de laboratorio para los suelos de Bogotá, D.C.

Parámetro geotécnico	Tipo de suelo	Promedio	COV %	Sesgo
Peso unitario	Granular	16 KN/m ³ -23 KN/m ³	4-7	0,99-1,00
	Cohesivos	11 KN/m ³ -24 KN/m ³	8-14	00,98-1,02
IP	Fración fina de suelos granulares	3 %-22 %	38-58	0,96-1,04
	Cohesivos	7 %-139 %	28-88	0,97-1,03
Cu de compresión inconfiada	Cohesivo	11,77 KN/m ² -71,12 KN/m ²	40-68	0,98-1,08
Cu de corte directo CU	Cohesivo	17,66 KN/m ² -43,16 KN/m ²	16-67	0,98-1,03
ϕ Corte directo CU	Cohesivo	16°-26°	14-25	0,99-1,01
C` de triaxial CD (KN/m ²)	Cohesivo	41,2 KN/m ² -89,27 KN/m ²	35-92	0,96-1,05
ϕ Triaxial CD (°)	Cohesivo	17°-27°	14-50	0,95-1,00
C de triaxial CU (KN/m ²)	Cohesivo	35,35KN/m ² -122,63 KN/m ²	29-100	0,90-1,16
ϕ Triaxial CU (°)	Cohesivo	10,66°-19,44°	10-50	0,98-1,02

Fuente: Elaboración propia.

Análisis estadístico de datos de SPT

Tabla 10
Resumen del análisis estadístico del ángulo de fricción a partir de SPT

Unidad	Promedio			Desviación estándar			Coefficiente de variación			Tipo de distribución	Valor ρ			Sesgo		
		-			-			-				-				
Qtb11	22,04	-	24,24	1,27	-	2,17	0,06	-	0,10	Normal	43,42 %	-	99,84 %	0,98	-	1,02
Qtb12	26,04	-	29,26	1,51	-	2,49	0,05	-	0,11	Lognormal	80,12 %	-	99,80 %	1,00	-	1,01
Qtb13	32,16	-	35,45	2,29	-	3,97	0,06	-	0,10	Lognormal	31,99 %	-	100,00 %	0,99	-	1,01
Qtb21	20,11	-	23,65	0,66	-	1,77	0,05	-	0,14	Normal	63,71 %	-	100,00 %	0,99	-	1,01
Qtb22	22,30	-	27,29	0,54	-	1,50	0,03	-	0,09	Normal	91,04 %	-	99,99 %	0,99	-	1,02
Qtb23	26,83	-	30,38	1,70	-	4,50	0,06	-	0,21	Lognormal	50,35 %	-	99,26 %	0,97	-	1,01
Qcc11	20,72	-	22,98	0,99	-	1,95	0,05	-	0,25	Normal	83,37 %	-	99,82 %	0,99	-	1,06
Qcc12	25,70	-	29,49	2,01	-	3,00	0,01	-	0,11	Lognormal	82,81 %	-	100,00 %	1,00	-	1,01
Qcc13	33,30	-	35,54	1,20	-	4,91	0,04	-	0,12	Lognormal	48,27 %	-	100,00 %	0,99	-	1,01
Qcc21	20,25	-	21,16	1,58	-	2,14	0,08	-	0,14	Lognormal	87,99 %	-	99,97 %	0,99	-	1,02
Qcc22	21,55	-	23,73	0,49	-	1,81	0,02	-	0,09	Lognormal	77,75 %	-	99,98 %	1,00	-	1,01
Qcc23	25,41	-	28,35	1,56	-	4,78	0,06	-	0,17	Lognormal	72,51 %	-	100,00 %	1,00	-	1,02

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11
Resumen del análisis estadístico de N60

Resumen análisis estadístico N60																
Unidad	Promedio			Desviación estándar			Coeficiente de variación			Tipo de distribución	Valor p			Sesgo		
Qtb11	3,00	-	5,00	1,31	-	2,32	0,33	-	0,77	Normal	27,70 %	-	76,74 %	1,00	-	1,33
Qtb12	7,00	-	12,00	2,11	-	4,36	0,19	-	0,39	Lognormal	27,03 %	-	93,79 %	0,89	-	1,14
Qtb13	17,00	-	25,00	0,00	-	9,44	0,20	-	0,38	Lognormal	33,26 %	-	99,98 %	0,96	-	1,05
Qtb21	1,00	-	5,00	0,00	-	4,05	0,28	-	0,81	Lognormal	1,73 %	-	99,71 %	1,00	-	2,00
Qtb22	3,00	-	9,00	0,98	-	2,32	0,18	-	0,77	Normal	12,04 %	-	97,86 %	0,86	-	1,33
Qtb23	8,00	-	15,00	2,81	-	11,02	0,23	-	0,72	Lognormal	45,46 %	-	99,56 %	0,93	-	1,13
Qcc11	2,00	-	4,00	0,97	-	3,38	0,21	-	0,80	Normal	21,60 %	-	97,86 %	1,00	-	2,00
Qcc12	7,00	-	12,00	0,00	-	5,90	0,32	-	0,81	Lognormal	48,13 %	-	97,20 %	1,00	-	1,11
Qcc13	19,00	-	27,00	0,00	-	13,21	0,13	-	0,42	Lognormal	61,60 %	-	100,00 %	0,95	-	1,05
Qcc21	2,00	-	3,00	0,00	-	2,20	0,38	-	1,49	Lognormal	28,23 %	-	94,48 %	0,67	-	1,00
Qcc22	3,00	-	5,00	0,00	-	1,91	0,11	-	0,67	Normal	15,53 %	-	100,00 %	1,00	-	1,33
Qcc23	7,00	-	13,00	2,27	-	10,54	0,29	-	0,99	Lognormal	49,74 %	-	99,50 %	0,97	-	1,29

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12
Rangos de datos estadísticos del ensayo de SPT para los suelos de Bogotá, D.C.

	Tipo de suelo	Promedio	COV(%)	Sesgo
N60	Granular	3-27 golpes/pie	13-81	0,89-2,00
	Cohesivo	2-15 golpes/pie	11-99	0,67-2,00
ϕ	Granular	20°-35°	1-12	0,97-1,06
	Cohesivo	20°-30°	2-21	0,98-1,02

Fuente: Elaboración propia.

Análisis estadístico de datos de CPT

Tabla 13
Resumen análisis estadístico qc (MPa) CPT

Unidad	Promedio			Desviación estándar			Coeficiente de variación			Tipo de distribución	Valor p			Sesgo		
Qtb11	5,85	-	28,04	1,71	-	12,92	0,11	-	1,61	Lognormal	0,00 %	-	98,94 %	0,82	-	1,07
Qtb12	5,07	-	27,07	2,26	-	49,49	0,16	-	4,33	Normal	0,00 %	-	98,02 %	0,67	-	1,07
Qtb13	7,49	-	37,65	0,59	-	14,24	0,08	-	0,68	Normal	0,19 %	-	99,54 %	0,95	-	1,08
Qtb21	0,51	-	1,65	0,01	-	1,01	0,01	-	1,08	Normal	0,00 %	-	0,01 %	0,96	-	1,32
Qtb22	0,56	-	1,90	0,01	-	1,47	0,02	-	0,84	Lognormal	0,00 %	-	70,34 %	0,94	-	1,38
Qtb23	1,14	-	7,37	0,12	-	40,25	0,05	-	3,14	Lognormal	0,00 %	-	93,55 %	0,51	-	1,20
Qcc11	3,03	-	22,35	0,42	-	8,36	0,14	-	0,95	Normal	0,28 %	-	99,88 %	0,87	-	1,10
Qcc12	4,90	-	28,19	0,41	-	9,57	0,05	-	0,71	Normal	3,18 %	-	98,44 %	0,92	-	1,05
Qcc13	4,97	-	34,06	2,47	-	25,27	0,11	-	1,24	Normal	0,97 %	-	99,27 %	0,88	-	1,04
Qcc21	0,26	-	5,10	0,01	-	3,74	0,01	-	1,59	Normal	0,00 %	-	98,38 %	0,95	-	1,55
Qcc22	0,51	-	8,55	0,02	-	8,04	0,01	-	1,72	Normal	0,00 %	-	98,72 %	0,86	-	1,55
Qcc23	0,43	-	7,07	0,15	-	17,23	0,14	-	1,96	Normal	0,00 %	-	59,89 %	0,81	-	1,58
Qta21	0,22	-	2,44	0,01	-	1,91	0,02	-	1,53	Normal	0,00 %	-	97,66 %	0,94	-	1,24
Qta22	0,39	-	1,30	0,01	-	0,71	0,02	-	0,75	Normal	0,00 %	-	58,11 %	0,98	-	1,18

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14
Resumen análisis estadístico CPT fs (KPa)

Unidad	Promedio		Desviación estándar		Coeficiente de variación		Tipo de distribución	Valor p		Sesgo	
Qtb11	96,78	- 972,83	37,97	- 1387,53	0,00	- 2,11	Lognormal	0,00 %	- 98,85 %	0,29	- 2,26
Qtb12	82,56	- 2284,12	28,62	- 1338,95	0,12	- 1,64	Lognormal	0,00 %	- 99,57 %	0,54	- 1,61
Qtb13	50,29	- 3791,66	7,29	- 1984,00	0,06	- 1,29	Normal	0,00 %	- 99,96 %	0,62	- 1,41
Qtb21	34,12	- 199,80	0,94	- 205,34	0,03	- 1,94	Lognormal	0,00 %	- 64,99 %	0,52	- 1,56
Qtb22	24,75	- 305,32	0,95	- 311,57	0,03	- 2,37	Lognormal	0,00 %	- 54,25 %	0,62	- 1,86
Qtb23	33,34	- 697,35	2,41	- 736,27	0,07	- 1,36	Lognormal	0,00 %	- 97,15 %	0,23	- 1,46
Qcc11	20,94	- 1796,14	3,74	- 691,24	0,04	- 1,84	Lognormal	0,34 %	- 99,88 %	0,54	- 1,76
Qcc12	28,13	- 3015,98	7,65	- 1046,47	0,03	- 1,70	Lognormal	0,11 %	- 99,55 %	0,23	- 1,87
Qcc13	24,22	- 1574,63	14,35	- 1437,14	0,16	- 1,50	Normal	3,43 %	- 99,98 %	0,06	- 1,51
Qcc21	11,91	- 461,82	1,21	- 418,64	0,03	- 2,06	Lognormal	0,00 %	- 99,27 %	0,25	- 4,33
Qcc22	10,40	- 1071,49	1,53	- 1181,07	0,08	- 1,73	Lognormal	0,00 %	- 99,92 %	0,32	- 1,50
Qcc23	11,18	- 1279,71	3,86	- 1206,98	0,13	- 1,80	Lognormal	0,00 %	- 89,66 %	0,59	- 1,65
Qta21	13,75	- 118,61	1,01	- 268,06	0,03	- 2,85	Lognormal	0,00 %	- 96,95 %	0,27	- 2,20
Qta22	1,09	- 255,55	0,80	- 209,28	0,06	- 2,66	Lognormal	0,00 %	- 82,42 %	0,07	- 1,90

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15
Resumen análisis estadístico Su (KPa) CPT

Unidad	Promedio		Desviación estándar		Coeficiente de variación		Tipo de distribución	Valor p		Sesgo	
Qtb21	11,44	- 66,22	2,65	- 83,91	0,05	- 2,02	Normal	0,00 %	- 74,68 %	0,741	- 1,429
Qtb22	0,55	- 108,40	0,50	- 180,89	0,03	- 1,82	Lognormal	0,00 %	- 64,68 %	0,917	- 1,481
Qtb23	35,17	- 489,09	15,00	- 449,32	0,13	- 1,38	Lognormal	0,00 %	- 85,95 %	0,287	- 1,219
Qcc21	4,82	- 324,03	0,58	- 401,77	0,02	- 1,71	Lognormal	0,00 %	- 97,48 %	0,580	- 1,636
Qcc22	12,70	- 567,00	0,92	- 482,33	0,02	- 2,05	Lognormal	0,00 %	- 92,77 %	0,508	- 1,611
Qcc23	29,87	- 462,34	9,59	- 483,54	0,18	- 1,55	Lognormal	0,00 %	- 81,16 %	0,719	- 1,588
Qta21	9,29	- 124,50	1,03	- 133,99	0,06	- 3,00	Lognormal	0,00 %	- 99,99 %	0,803	- 1,534
Qta22	20,32	- 61,16	0,77	- 140,77	0,03	- 2,30	Normal	0,00 %	- 82,27 %	0,908	- 1,458

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16
Rangos de datos estadísticos del ensayo de CPT para los suelos de Bogotá, D.C.

	Tipo de suelo	Rango	COV(%)	Sesgo
qc (MPa)	Granular	3-37,6	5-433	0,67-1,10
	Cohesivo	0,22-8,5	1-314	0,51-1,58
fs (KPa)	Granular	20,94-3791,66	0-211	0,06-2,26
	Cohesivo	2-1279	3-285	0,07-4,33
Su (KPa)	Cohesivo	0,50-567	2-230	0,29-1,64

Fuente: Elaboración propia.

RESISTENCIA O CAPACIDAD PORTANTE Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los factores de resistencia presentados como resultado tomaron en cuenta varias dimensiones de cimentaciones tanto superficiales como profundas.

Para cimentaciones superficiales se trabajó con una relación de $B/L=1$, y dimensiones variables de B y L de 0,5 a 2,5 m en intervalos de 0,5, para una profundidad de cimentación de 1,0 m. La capacidad portante o resistencia para este tipo de cimentaciones se calculó

considerando las unidades geotécnicas encontradas en los cinco primeros metros de profundidad.

Para cimentaciones profundas se trabajó con diámetros de pilotes variables de 0,2 a 1,0 m y longitud de pilotes de 10 a 40 m, en intervalos de 10.

Los valores de sesgo de la resistencia y COV de la resistencia son variables y dependen en un alto grado de la dispersión de los datos tomados para el análisis estadístico de parámetros de resistencia, los cuales son el insumo base para la obtención de los factores de resistencia.

Cimentaciones superficiales

Como resultado del análisis de Montecarlo efectuado para cimentaciones superficiales, se tiene que los valores de sesgo de la resistencia o capacidad portante para las unidades geotécnicas correspondientes a suelos granulares varía de 0,98 a 1,00 y para suelos cohesivos varía entre 0,94 y 1,02.

Pilotes hincados

Para pilotes hincados, los valores de sesgo de la resistencia por fuste para las unidades geotécnicas correspondientes a suelos granulares varía de 0,83 a 1,02 y para suelos cohesivos varía entre 0,57 y 0,95. Para resistencia por punta para las unidades geotécnicas correspondientes a suelos granulares varía de 0,95 a 1,02 y para suelos cohesivos varía entre 0,91 y 1,09.

Pilotes preexcavados

Del análisis de Montecarlo hecho para pilotes preexcavados se tiene que los valores de sesgo entre la distribución real de los datos y el ajuste a la distribución teórica de la resistencia por fuste para las unidades geotécnicas correspondientes a suelos granulares varía de 0,99 a 1,00 y para suelos cohesivos varía entre 0,95 y 1,00. Para resistencia por punta para las unidades geotécnicas correspondientes a suelos granulares varía de 0,99 a 1,00 y para suelos cohesivos varía entre 0,97 y 1,01.

De los resultados de los análisis de Montecarlo realizados mediante el *software* estadístico Risk se obtuvo que la resistencia o capacidad portante última se ajusta a diferentes tipos de distribuciones, que no siempre son las distribuciones normal y lognormal, pero a su vez,

aunque el *software* presenta la distribución que mejor se ajusta a los datos, los valores de p obtenidos en la prueba de bondad y ajuste son en su mayoría inferiores al 5 %; por tanto, se puede deducir que aunque la distribución que presenta mayor ajuste sea diferente de la distribución normal o lognormal, no se puede concluir que estos dos tipos de distribuciones no se puedan ajustar en cierto grado a los resultados de los análisis de Montecarlo.

FACTORES DE CARGA Y CARGAS

Para el caso de factores de resistencia obtenidos a partir de una distribución lognormal se adoptan relaciones de carga muerta sobre carga viva Q_D/Q_L de 1 a 10, con el fin de ver la variabilidad de los factores de resistencia con respecto a diferentes relaciones Q_D/Q_L . Para factores de resistencia obtenidos a partir de una distribución normal, se establecieron valores de carga viva por m^2 , partiendo de los valores de carga viva presentados en la NSR-10.

De acuerdo con lo descrito en la norma AASHTO (2012) y del código CCP14, el detalle del desarrollo de los factores de resistencia para cimentaciones es presentado por Allen (2005). A partir de lo mencionado a continuación se presentan los factores de carga y los parámetros estadísticos correspondientes para una distribución lognormal, tomados como base para el desarrollo de los factores de resistencia presentados en la norma AASHTO (2012), los cuales son adoptados para este artículo (tabla 17).

Tabla 17
Factores de carga y parámetros estadísticos de las cargas usados por Paikowsky et al. (2004)

Tipo de carga	Sesgo	Coefficiente de variación	Factores de carga usados
Carga muerta	$\lambda_D = 1,05$	$COV_{Q_D} = 0,1$	$\gamma_{DL} = 1,25$
Carga viva	$\lambda_L = 1,15$	$COV_{Q_L} = 0,2$	$\gamma_{LL} = 1,75$

Fuente: Allen (2005).

Para el cálculo de los factores de resistencia también se tomaron los factores de mayoración de carga presentados en la norma NSR-10, título B, numeral B.2.4.2, correspondiente a 1,2 para carga muerta y 1,6 para carga viva.

RESULTADOS DE FACTORES DE RESISTENCIA

Los factores de resistencia para cimentaciones superficiales, determinados para las condiciones locales, para una distribución lognormal comparados con los factores de resistencia presentados en la norma, son aproximadamente entre un 13 y 68 % menores que los presentados en la norma CCP14 (tabla 18).

Tabla 18

Factores de resistencia promedio para cimentaciones superficiales-lognormal vs. factores norma CCP14- β 3,5

Método/suelo/condición	Norma $A_{\phi CCP14}$	ϕ Obtenidos	
		A partir de γ CCP14	A partir de γ NSR10
Método teórico (Munfakh et al., 2001) Arcillas	0,50	0,22	0,21
Método teórico (Munfakh et al., 2001) Arenas CPT	0,50	0,17	0,16
Método teórico (Munfakh et al., 2001) Arenas SPT	0,45	0,39	0,37
Método semiempírico (Meyerhof, 1957) Arenas	0,45	0,33	0,31
Método semiempírico (Meyerhof, 1957) Arcillas	0,45	0,34	0,32

Fuente: Elaboración propia.

Los factores de resistencia para pilotes hincados, determinados para las condiciones locales, para una distribución lognormal, para factores de carga de la norma CCP14 y un índice de confiabilidad de 3,5, los cuales, comparados con los factores de resistencia presentados en la norma CCP14, dependiendo del método usado para el cálculo de la resistencia, son mayores o menores que los presentados en la norma CCP14. Los factores de resistencia obtenidos por el método α , método λ y Schmertmann en arcillas son entre un 8 % y un 34 % menores que los presentados en la norma, y los factores de resistencia obtenidos utilizando el método β en arcillas, Meyerhof en arenas y Schmertmann en arenas son entre un 6 % y un 76 % mayores que los presentados en la norma CCP14, empleando los mismos métodos (tabla 17).

Tabla 19

Factores de resistencia promedio para pilotes hincados-lognormal- β 3,5

Método/suelo/condición		Norma	ϕ Obtenidos	
		ϕ CCP14	A partir de γ CCP14	A partir de γ NSR10
Método α - Arcillas		0,35	0,30	0,29
Método β - Arcillas		0,25	0,44	0,41
Método λ - Arcillas		0,40	0,37	0,35
Meyerhof-SPT-Arenas		0,30	0,35	0,33
Schmertmann-CPT Arenas	Fuste	0,50	0,43	0,41
	Punta	0,50	0,53	0,50
Schmertmann-CPT Arcillas	Fuste	0,50	0,33	0,31
	Punta	0,50	0,46	0,44

Fuente: Elaboración propia.

Los factores de resistencia para pilotes preexcavados, determinados para las condiciones locales, para una distribución lognormal comparados con los factores de resistencia presentados en la norma, son aproximadamente entre un 20 y 35 % menores que los presentados en la norma CCP14.

Tabla 20

Factores de resistencia promedio para pilotes preexcavados-lognormal- β 3,5

Método/suelo/condición		Norma	ϕ Obtenidos	
		ϕ CCP14	A partir de γ CCP14	A partir de γ NSR10
Método α - Reese O'Neill-Arcillas	Fuste	0,45	0,36	0,34
Esfuerzos totales - Reese O'Neill-Arcillas (9su)	Punta	0,40	0,26	0,25
Método β - Reese O'Neill-Arenas	Fuste	0,55	0,44	0,42
Reese O'Neill-Arenas	Punta	0,50	0,35	0,33

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 2 y 4 corresponden a la unidad geotécnica QT21. Se puede evidenciar la variabilidad de los factores de resistencia con respecto a la proveniencia de los parámetros utilizados para el cálculo de la resistencia, el método utilizado para el cálculo de la capacidad portante y la clase de distribución usada para la determinación de los factores de resistencia.

En la figura siguiente (figura 2), que corresponde a una distribución lognormal, los factores de resistencia disminuyen a medida que aumenta la relación Q_D/Q_L , mientras que para una distribución normal los factores de resistencia se incrementa con la relación Q_D/Q_L (figura 4).

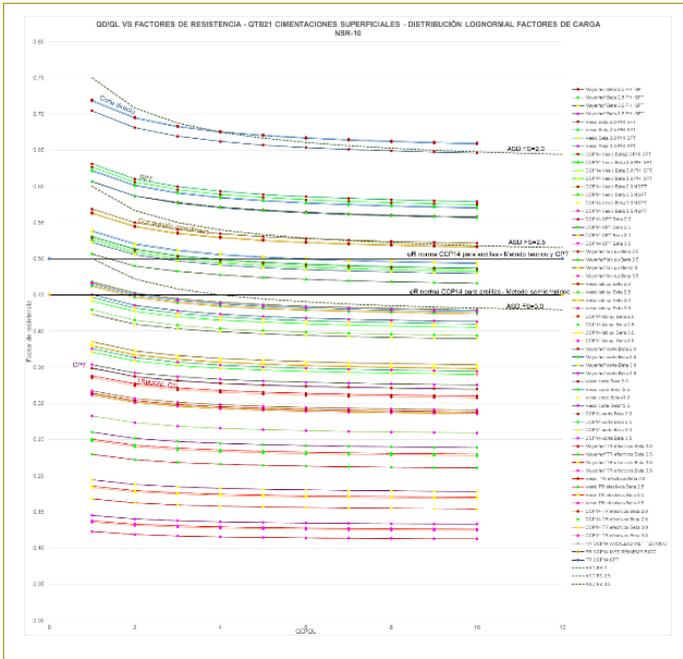


Figura 2. Factores de resistencia vs. Q_D/Q_L - QTB21- cimentaciones superficiales - factores de carga CCP14.
Fuente: Elaboración propia.

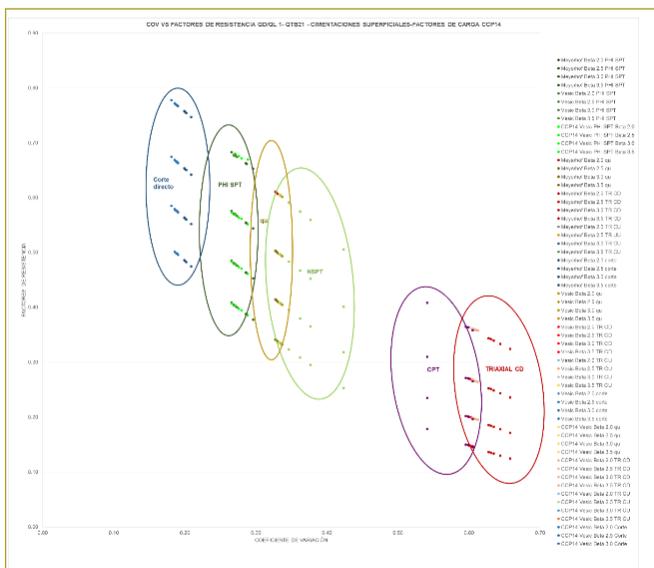


Figura 3. Factores de resistencia vs. COV Q_D/Q_L 1 - QTB21 - cimentaciones superficiales - factores de carga CCP14.
Fuente: Elaboración propia.

TRABAJOS FUTUROS DE INVESTIGACIÓN

En el desarrollo del presente artículo se identificó la necesidad de adelantar investigaciones en los siguientes aspectos:

- Análisis de variabilidad de parámetros geotécnicos particulares para cada región del país, en los cuales se obtengan tipo de distribución y datos estadísticos, suficientes para la aplicación de análisis de confiabilidad en cualquier diseño geotécnico.
- Obtención de factores de carga propios para los diseños estructurales realizados en el ámbito local, con el objeto de contar con dicha información para una mejor calibración de los factores de resistencia.

CONCLUSIONES

De los ensayos de CPT se contó con bastantes datos, pero aunque éstos se agruparon por unidad geotécnica y su análisis estadístico se hizo cada 1,0 m, se presenta una gran dispersión en los datos, lo cual conduce a coeficientes de variación que pueden ir desde 0 % hasta el 433 %. Para los ensayos triaxiales, al tener pocos datos, los cuales pueden corresponder a valores o muy altos o muy bajos, esto hace que se presenten coeficientes de variación para este tipo de datos que van desde el 10 % hasta el 100 %.

El parámetro q_c , obtenido a partir del ensayo de CPT, se ajusta mejor a una distribución normal, y los parámetros f_s y S_u del CPT se ajustan mejor a una distribución lognormal. Los datos de N_{60} y ángulo de fricción obtenidos a partir de correlaciones mediante los datos de SPT, se ajustan mejor a una distribución lognormal.

Los factores de resistencia no son valores constantes, ya que varían de acuerdo con el tipo de suelo, los ensayos que se usen para la determinación de los factores de resistencia, ya sean de campo o laboratorio, y en general de los resultados de los factores de resistencia. De ahí se deduce que los valores más altos de factores de resistencia se obtuvieron para los factores calculados a partir del ensayo de corte directo, y los menores valores de factores de resistencia fueron obtenidos para CPT y triaxiales, lo que se puede atribuir a que para éstos se presentan coeficientes de variación altos.

El coeficiente de variación de la resistencia influye en los factores de resistencia. Para el caso de factores

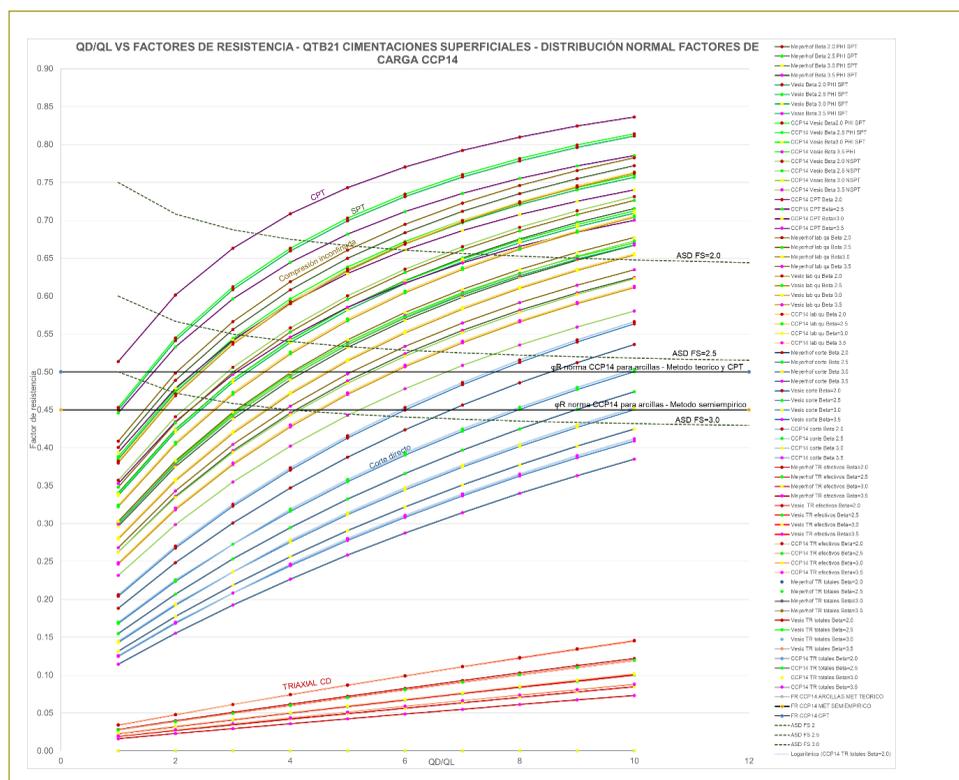


Figura 4. Factores de resistencia vs. Q_p/Q_L - QTB21- cimentaciones superficiales - factores de carga CCP14 - distribución normal para $Q_L=43 \text{ KN/m}^2$.

Fuente: Elaboración propia.

obtenidos a partir de distribución lognormal, se puede concluir que los factores de resistencia disminuyen a medida que el coeficiente de variación es mayor; con base en lo anterior se puede decir que la dispersión de los datos o de los parámetros de resistencia, así como el número de datos, influye en los resultados de los factores de resistencia.

Es posible que la distribución normal no represente las condiciones reales del comportamiento del suelo al colocar carga, puesto que los factores de resistencia son mayores al aplicar mayor carga, cuando por el contrario se considera que al aplicar una mayor carga se debe trabajar con factores de resistencia más conservadores, ya que a mayores cargas es más probable la ocurrencia de una falla en el suelo, lo cual sí es representado por la distribución lognormal.

Los factores de resistencia para cimentaciones superficiales, determinados para las condiciones locales, para una distribución lognormal y un índice de confiabilidad de 3,5 comparados con los factores de resistencia presentados por norma, son entre un 13 y 68 % menores que los presentados en la norma CCP14.

Los factores de resistencia para pilotes hincados, determinados para las condiciones locales, para una distribución lognormal, para factores carga de la norma CCP14 y un índice de confiabilidad de 3,5, los cuales, comparados con los factores de resistencia presentados en la norma CCP14, dependiendo del método usado para el cálculo de la resistencia, son mayores o menores que los presentados en la norma CCP14. Los factores de resistencia obtenidos por el método α , método λ y Schmertmann en arcillas son entre un 8 y 34 % menores que los presentados en la norma y los factores de resistencia obtenidos utilizando el método β en arcillas, Meyerhof en arenas y Schmertmann en arenas son entre un 6 y 76 % mayores que los presentados en la norma CCP14 utilizando los mismos métodos.

Los factores de resistencia para pilotes preexcavados, determinados para las condiciones locales, para una distribución lognormal comparados con los factores de resistencia presentados en la norma, son entre un 20 y 35 % menores que los presentados en la norma CCP14.

Al trabajar con los factores de resistencia presentados en la norma CCP14 estaríamos trabajando realmente con índices de confiabilidad entre 2,5 y 3,0 y no de 3,5, como lo presenta la norma CCP14. Partiendo de lo anterior se concluye que al utilizar los factores de resistencia presentados en la norma se está sobrestimando la capacidad portante y subdimensionando la cimentaciones, al no tener en cuenta factores de resistencia que tomen las características geotécnicas existentes a escala local.

Sin embargo, como resultado de este estudio se obtuvo que los factores de resistencia son muy propensos a variar, dependiendo del origen de los parámetros de resistencia, de la cantidad de datos tomada para los análisis estadísticos, de la distribución de los datos, de la dispersión de los datos, del índice de confiabilidad, de las dimensiones adoptadas para el cálculo de la resistencia, de los coeficientes de variación de la resistencia y las cargas y de los factores de carga.

Para este estudio se utilizaron factores de carga presentados en la CCP14 y NSR10, pues no se cuenta con estudios locales en los que se hayan determinado factores de carga propios para las estructuras que se diseñan a escala local.

Nota

Para la obtención de los factores de resistencia presentados en este artículo se empleó la información geotécnica existente del estudio llamado “Diseño para la primera línea del metro en el marco del sistema integrado de transporte público (SITP) para la ciudad de Bogotá (Colombia)”, en la cual se detectaron algunas imprecisiones en los parámetros geotécnicos y en los perfiles estratigráficos que se tomaron como base para la asignación de unidades geotécnicas.

Finalmente, los factores de resistencia aquí presentados corresponden a un perfil estratigráfico conformado por un solo estrato de suelo, el cual corresponde a cada una de las catorce unidades geotécnicas.

REFERENCIAS

- American Association of State Highway and Transportation Officials (2012). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. Recuperado el 25 de 07 de 2017, de <http://utc2.edu.vn/Uploads/File/AASHTO%20LRFD%202012%20BridgeDesignSpecifications%206th%20Ed%20%28US%29.PDF>.
- Allen, T. (02 de 2005). *Development of Geotechnical Resistance Factors and Downdrag Load Factor for LRFD Foundation Strength Limit State Design* (FHWA, editor). Recuperado el 12 de 2018, de <https://www.semanticscholar.org/paper/Development-of-Geotechnical-Resistance-Factors-and-Allen/409e46f3c7773defbb7f24382d3bc284c92ba416>.
- Arias, C. A. (05 de 03 de 2015). *Diseño geotécnico de cimentaciones aplicando factores de carga y resistencia LRFD*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Baecher, G. & Cristhian, J. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. En *18 Load and resistance factor design* (pp. 433-455). Great Britain.
- Foye, J. (12 de 2004). *Limits States Design of Deep Foundations*. Recuperado el 05 de 07 de 2017, de <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1610&context=jtrp>.
- González, A. J. (2006). *El uso de factores de carga y resistencia (LRF) en geotecnia*. Recuperado el 20 de 07 de 2017, de http://tycho.escuelaing.edu.co/contenido/encuentros-suelosyestructuras/documentos/normatividad/02_alvaro_gonzalez.pdf.
- Moreno, N. (03 de 08 de 2011). *Estructuración de la norma sismorresistente 2010 - NSR-10, basada en el modelo de estados límite de diseño*. Recuperado el 07 de 21 de 2017, de http://www.lacpei.org/LACPEI2011-Medellin/published/ED232_Moreno.pdf.
- NCHRP Report 507 (2004). *Load and Resistance Factor Design (LRFD) For Deep Foundations*. Recuperado el 24 de 07 de 2017, de <http://140.112.12.21/issmge/missing/NCHRP507.pdf>.
- VI Congreso ACHE (2014). *Bases de cálculo para el proyecto de cimentaciones acorde con el eurocódigo*. Recuperado el 12 de 07 de 2017, de <http://www.ideam.es/files/articles/Bases%20de%20c%C3%A1culo%20del%20EC-7.pdf>.



CONMEMORACIÓN CENTENARIA (1920-2020)

Julio Garavito Armero

Breve semblanza sobre su vida, obra y época como ingeniero, profesor, matemático y astrónomo

Brief overview of his life and works as engineer, teacher, mathematician, and astronomer

GABRIEL HUMBERTO PULIDO CASAS

Profesor distinguido de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

gabriel.pulido@escuelaing.edu.co

Recibido: 15/10/2019 Aceptado: 01/11/2019

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se condensan aspectos selectivos de algunos trabajos elaborados por el autor respecto a la vida, obra y época de don Julio Garavito Armero, ilustre personaje, considerado gloria de la ciencia y de la ingeniería colombianas.

Se destacan, dentro de la breve semblanza, los perfiles biográficos desde su origen y formación como estudiante, al igual que su trayectoria profesional como matemático, ingeniero, astrónomo y profesor. Además, se destacan sus trabajos y contribuciones más reconocidos en el país y en el exterior, así como en los entornos nacional e internacional de su época.

Este artículo representa una contribución al conjunto de conmemoraciones que la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito ha programado con ocasión del centenario del fallecimiento de este distinguido colombiano.

Abstract

This article summarizes selected issues addressed in the works of the author regarding the life, works, and times of Mr. Julio Garavito Armero, highly regarded as a glory of Colombian science and engineering. Some aspects to highlight from this overview are the biographical profiles from his origins and training as a student, as well as his career as mathematician, engineer, astronomer, and teacher.

Additionally, his most recognized works and contributions at the national and international levels are emphasized, along with the national and international contexts of his time.

This article is a contribution to the set of commemorative events that Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito has planned for the centenary of the death of such a distinguished Colombian citizen.

DON JULIO GARAVITO: SU VIDA, OBRA Y ÉPOCA

Reseña personal

Julio Garavito Armero nace en Bogotá el 5 de febrero de 1865, en el seno de una típica y respetable familia santafereña, conformada por don Hermógenes Garavito y doña Dolores Armero. Fueron sus hermanos mayores José María y Jorge. Los menores, Justino, Fernando y María Teresa.

Al nacer Julio Garavito, el país está constituido como la Federación Granadina y su presidente es don Manuel Murillo Toro, distinguido representante de la línea civilista y radical del liberalismo colombiano.

Su niñez, juventud, estudios e inicio de sus actividades profesionales, docentes y científicas coinciden con uno de los periodos más críticos y conflictivos de la historia de Colombia: duras confrontaciones doctrinarias y partidistas, cuatro guerras civiles (1876, 1885, 1895 y 1899, esta última conocida como la guerra de los Mil Días) y la separación de Panamá en el año 1903. Ya en su madurez, ocurrió la tragedia de la Primera Guerra Mundial entre 1914 y 1919.

A los diez años ingresa al Colegio Mayor de San Bartolomé, entonces regentado por laicos, y allí obtiene su título de bachiller en Filosofía y Letras, en 1884. Desde esa época y aulas, con orientaciones como las del matemático Manuel Antonio Rueda Jara, primer director de la revista *Anales de Ingeniería* de la Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI), empieza a mostrar su inclinación y vocación por las ciencias matemáticas y astronómicas. En 1885 estalla una revolución que da lugar al fin de la Federación Granadina y abre paso a la República de Colombia. Durante la interrupción forzada de sus estudios se dedica, dentro de una temprana vocación, a conocer las matemáticas elementales. En 1887 ingresa a



Colegio Mayor de San Bartolomé, Bogotá.

la Facultad de Ingeniería de la ya constituida Universidad Nacional de Colombia, con la rectoría del doctor Rafael Espinosa Escallón.

En junio de 1891 recibe el título de profesor de Matemáticas y, en octubre siguiente, el de ingeniero civil. De inmediato, lo nombran profesor de Cálculo Infinitesimal, Mecánica Racional y Astronomía.

Bien pronto lo designan director del Observatorio Astronómico Nacional, fundado por José Celestino Mutis en 1803 y que ya había sido dirigido por Francisco José de Caldas. Ese importante cargo lo ejerce durante 27 años, periodo coincidente con la segunda mitad de su vida; tal circunstancia, junto con su vocación, lo conduce a sumergirse en muy altos niveles de dedicación, alcance, profundidad y logros en sus estudios, investigaciones, publicaciones y trabajos astronómicos de mucha relevancia y reconocimientos nacionales e internacionales.

En 1893 contrae matrimonio con María Luisa Cadená, quien fallece en 1916, sin dejar descendencia. A partir de entonces su salud se deteriora, se limitan sus actividades en la Facultad de Ingeniería y fallece el 11 de marzo de 1920, en medio de conmovión y honores nacionales. La velación se lleva a cabo en el Observatorio Astronómico Nacional, las exequias en la Catedral, la conducción al cementerio en hombros por sus alumnos y las palabras de despedida están a cargo de dos de sus discípulos, los ingenieros Laureano Gómez y Jorge Álvarez Lleras.

EL ENTORNO NACIONAL E INTERNACIONAL DE LA ÉPOCA (1865-1920)

Un perfil del país en la época de Garavito

El país, por entonces, había transitado de la forma de organización federal al esquema de la Confederación Granadina desde mayo de 1858 hasta mayo de 1863. A partir de 1886, con la promulgación de la nueva y famosa Constitución, el país adoptó la forma de gobierno unitario y centralista, liderada por Rafael Núñez y con el nombre de República de Colombia, vigente hasta la fecha.

Como se ha señalado, la época de Julio Garavito se correlaciona con numerosos eventos de convulsión y crisis, de honda significación dentro del transcurrir del país. Algunos acontecimientos de ese periodo se destacan a continuación:

- **Guerra civil de 1876.** Librada entre los conservadores y los radicales, ganada por estos últimos, pero a costa de su serio debilitamiento y el final de ese movimiento, que había alcanzado amplia vigencia y repercusión en la vida de la nación (la República Radical).
- **Guerra civil de 1885.** Originada por fuerzas liberales opositoras al centralismo y proyecto de la Regeneración del presidente Núñez. El triunfo del gobierno sentó las bases para la profunda reforma constitucional que proclamó la Constitución de 1886.
- **Guerra de los Mil Días (1899 - 1902).** Generada en un principio por enfrentamiento entre el Partido Liberal y el gobierno del Partido Conservador liderado por Manuel Antonio Sanclemente. Más adelante se agrava con su derrocamiento y la toma del poder por José Manuel Marroquín, del Partido Conservador, en alianza con el liberal Aquileo Parra. El enfrentamiento desencadena una larga confrontación entre un ejército gubernamental relativamente firme y organizado y un ejército de guerrillas liberales pobremente armado y anárquico. Concluye con la victoria conservadora, la devastación económica del país, más de 100.000 muertos y algo de trascendencia para Colombia: la agregación de un álgido factor que, sumado a muchos otros de grave naturaleza y complejidad, condujo a la desastrosa separación de Panamá, en noviembre de 1903.
- **Separación de Panamá.** Penoso hecho ocurrido el 3 de noviembre de 1903, muy a continuación de la guerra de los Mil Días. Panamá, tras más de 70 años de haber pertenecido a Colombia como uno de sus departamentos y luego de cuatro intentos anteriores, logra su separación definitiva. Ésta se materializa mediante la concurrencia de múltiples crisis y conflictos cuyo eje principal fue el proyecto del canal interoceánico, el fracaso de la firma del tratado entre Colombia y Estados Unidos para la construcción y operación del canal, los antecedentes de secesión y la intervención de Estados Unidos en apoyo a los separatistas. Sobre todo, por la firme e irreversible decisión de construir el canal, una vez configurado el estruendoso fracaso del proyecto francés inicialmente liderado por Fernando de Lesseps, el famoso y exitoso constructor del canal de Suez.
- **Gobiernos y periodos presidenciales.** La República de Colombia fue gobernada, durante el periodo



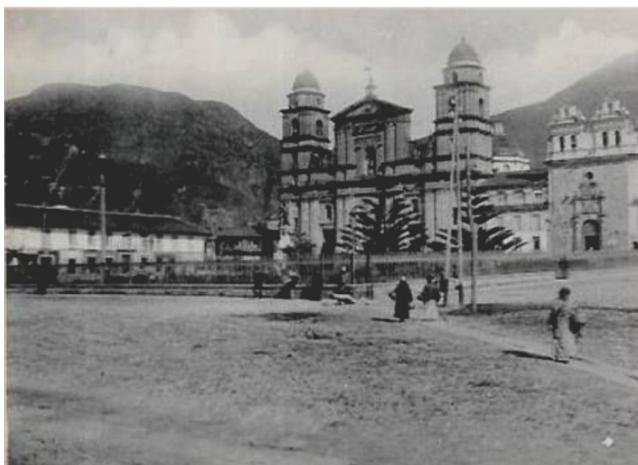
Canal de Panamá.

1865-1920, en su orden, por los siguientes presidentes: Manuel Murillo Toro (1864-1866 y 1872-1874), José María Rojas Garrido (1866), Manuel Santos Acosta (1867-1868), José Santos Gutiérrez (1868-1870), Eustorgio Salgar (1870-1872), Santiago Pérez (1869 y 1874-1876), Aquileo Parra (1876-1878), Sergio Camargo (1877), Julián Trujillo (1878-1880), Rafael Núñez (1880-1882, 1884-1886, 1886-1888 y 1892-1894), Francisco Javier Zaldúa (1882), José Eusebio Otálora (1882-1884), José María Campo Serrano (1886), Eliseo Payán (1887-1888), Carlos Holguín (1888-1892), Miguel Antonio Caro (1892-1898), Manuel Antonio Sanclemente (1898-1900), José Manuel Marroquín (1900-1904), Rafael Reyes (1904-1909), Ramón González Valencia (1909-1910), Carlos E. Restrepo (1910-1914), José Vicente Concha (1914-1918), y Marco Fidel Suárez (1918-1921).

Desarrollo, infraestructura, matemáticas, ingeniería y obras públicas de la época

El país, como los de Latinoamérica en general, se desarrollaba lenta y dificultosamente en sus frentes político, económico y social, cuando ya habían transcurrido más de 50 años de vida independiente.

Los mayores esfuerzos de Colombia se concentraban en la transformación de una economía con muy bajos niveles de productividad e integración. Su población, hacia 1912, apenas sobrepasaba los cinco millones de habitantes y la población de Bogotá, en 1887, era cercana a los 80.000.



Plaza de Bolívar y Catedral Primada de Bogotá en época de Julio Garavito.

Infraestructura

En cuanto a vías y transporte, el eje principal del sistema de navegación fluvial era el río Magdalena. En la región montañosa de la parte oriental (la más poblada), la vía más importante era la del sector Honda-Bogotá, que junto con la vía Honda, Neiva, Cali, Popayán, y la de Ibagué a Cartago y Bogotá-Cambao (1882), constituían el núcleo del sistema terrestre.

La Carretera Central del Norte, partiendo de Bogotá, fue la primera de carácter nacional construida en el gobierno de Rafael Reyes (1904 - 1909). El complemento del sistema vial estuvo constituido por la red de vías y caminos coloniales, caminos de herradura y trochas de carácter regional (Vélez-Carare, Popayán-La Plata, Pasto-Puerto Asís, Pasto-Barbacoas, Popayán-Micay y otras).

Por las precarias condiciones viales, se dice que al país llegaron primero los vehículos que las carreteras (el primero arribó a Medellín en 1895). La primera carretera en afirmado se construyó en 1865, en el sector Cúcuta - Los Cachos, sobre el río Zulia.

Una referencia clave en este contexto es la creación del Ministerio de Obras Públicas, por medio de la Ley 46 de 1905, como “Ministerio especial para el manejo y dirección de las obras públicas”.

En la modalidad de transporte férreo, el país alcanzó en esa época un desarrollo relativamente satisfactorio, si se tiene en cuenta la temprana construcción del Ferrocarril Transoceánico de Panamá, con 80 kilómetros, terminado en 1855 y en su momento el más importante proyecto férreo del mundo, muy a continuación del pri-

mero, construido en Inglaterra. Este desarrollo fue posible, en buena parte, gracias a los recursos provenientes del gobierno de Estados Unidos como “indemnización” a Colombia por la pérdida de Panamá, particularmente asignados a obras públicas en la administración de Pedro Nel Ospina.

En el periodo 1870 - 1920 se construyeron numerosos sectores de la red ferroviaria, como Cartagena - Calamar, Bogotá - Facatativá - Girardot, Cúcuta-Puerto Villamizar, Barranquilla-Sabanilla, Medellín - Puerto Berrío, Bogotá - Soacha-Salto de Tequendama, Bogotá - Tunja, Atlántico - Fundación, Espinal - Neiva, Cali-Buenaventura.

MATEMÁTICAS

En Colombia, el limitado desarrollo de las matemáticas de la época se había iniciado hacia 1762, con la llegada de José Celestino Mutis a la Nueva Granada como médico del virrey Messía de la Zerda, la creación de la Expedición Botánica y la implantación de la cátedra de Matemáticas en el Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario. Es claro que el desarrollo inicial de las matemáticas se dio dentro de una muy cercana relación con la ingeniería y, más aún, con la ingeniería civil. Las matemáticas vinieron a profesionalizarse a partir de 1950, dentro de los programas de la Universidad Nacional de Colombia.

INGENIERÍA

Los estudios formales y el ejercicio profesional habían tenido su origen al lado de la ingeniería militar, hacia 1961. En 1867 se creó la Universidad Nacional de Colombia, durante la presidencia del general Santos Acosta.

El mundo en la época de Garavito

Una breve y selectiva panorámica mundial de la época acá considerada, alrededor de personajes y hechos destacables en los campos de la ciencia, las matemáticas y la ingeniería, incluye la siguiente enumeración:

- En cuanto a las matemáticas en el siglo XIX, el matemático francés Augustin-Louis Cauchy aportó un enfoque lógico al cálculo, con una visión en

cantidades finitas y el concepto de límite. El matemático alemán Richard Dedekind contribuyó con definiciones requeridas en cuanto a los números reales, a partir de los números racionales. Euler, Lagrange y Fourier aportaron soluciones claves al concepto de función. Gauss introdujo el concepto de números complejos y dio un gran impulso al álgebra y su transformación, para pasar del mero estudio de los polinomios al análisis de la estructura de sistemas algebraicos. Fourier agregó elementos importantes, relativos a sumas infinitas de expresiones con funciones trigonométricas, dentro de lo conocido como series de Fourier, de gran utilidad en matemáticas puras y aplicadas. El matemático inglés George Boole y el matemático ruso Georg Cantor transformaron los fundamentos de las matemáticas con su investigación de las leyes del pensamiento y teoría de conjuntos.

En Colombia, el limitado desarrollo de las matemáticas se había iniciado hacia 1762, con la llegada de José Celestino Mutis a la Nueva Granada como médico del virrey Messía de la Zerna, la creación de la Expedición Botánica y la implantación de la cátedra de Matemáticas en el Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario. Es claro que el desarrollo inicial de las matemáticas se dio dentro de una muy cercana relación con la ingeniería y, más aún, con la ingeniería civil.

Otros hechos de trascendencia de la época:

- **1865.** Publicación de la obra de ciencia ficción *De la Tierra a la Luna*, de Julio Verne.
- **1867.** Fallecimiento del físico inglés Michael Faraday, inventor, entre otros, del freno de aire para los ferrocarriles.
- **1868.** Final de la vida del físico francés Jean Foucault, quien demostró experimentalmente la rotación de la tierra con el famoso péndulo de Foucault.
- **1872.** Nacimiento del escritor, matemático y filósofo británico Bertrand Russell, Premio Nobel de Literatura en 1950.
- **1874.** Nacimiento del ingeniero e inventor italiano Guillermo Marconi, impulsor de la radiotransmisión a larga distancia y del desarrollo de la telegrafía sin hilos. Premio Nobel de Física en 1909.
- **1879.** Nace el físico alemán Albert Einstein, considerado como el científico más importante y conocido del siglo XX. Se le concedió el premio Nobel de Física en 1921, por sus trabajos en la ley del efecto fotoeléctrico. Sus aportes a la teoría de la relatividad especial y general y los desarrollos de la bomba atómica fueron de especial trascendencia.
- **1884.** Muere Gregor Johann Mendel, fundador de la genética.
- **1896.** Muere el ingeniero sueco Alfred Nobel.
- **1914.** Se inaugura el canal de Panamá.
- **1917.** Comienza la Revolución de Octubre en Rusia y finaliza el régimen de los zares.
- **1914-1919.** Primera Guerra Mundial.



Julio Garavito, interviniendo en la actividad política.

DON JULIO GARAVITO: UN SÍMBOLO DE LA CIENCIA Y DE LA INGENIERÍA COLOMBIANAS

Este reconocimiento se apoya en lo trascendente de sus facetas, en lo valioso de sus estudios y trabajos desarrollados a lo largo de su fecunda vida profesional, así como en lo correspondiente a la formación de matemáticos e ingenieros en la Universidad Nacional de Colombia, especialmente en su Facultad de Ingeniería.

Se dice, con justicia, que la ciencia en los albores de nuestra nacionalidad se gesta, configura e impulsa gracias a las contribuciones y aportes de “tres sabios distintos y una sola obra de ciencia”. En primer término, Mutis el médico y botánico español, con su vivencia de 48 de los 76 de su existencia en tierras de la Nueva Granada y sus realizaciones cumbres, representadas en la organización y funcionamiento de la Expedición Botánica y el patrocinio de la construcción del Observatorio Astronómico. En segundo lugar, Caldas y su participación en esa Expedición, la dirección del Observatorio y sus investigaciones varias en ciencias naturales. En tercera instancia, y cronológicamente, Julio

Garavito con sus valiosos, aportes a las matemáticas, la astronomía y la ingeniería.

Dentro del propósito y alcance de este perfil, a continuación se hace una breve descripción de su trayectoria y logros en ciencias e ingeniería:

- **1891.** Se gradúa de profesor de Matemáticas y de ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia.
- Se incorpora, recién graduado, a la nómina de profesores de la Facultad de Ingeniería, en la que regenta las cátedras de Cálculo Infinitesimal, Análisis Matemático, Mecánica Racional y Astronomía.
- Interviene, muy directa y efectivamente, en la reestructuración de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.
- Participa activamente en la fundación de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, de la que luego será su presidente en 1916.
- **1892.** Lo nombran en la Dirección del Observatorio Astronómico, donde desarrolló numerosas y valiosas observaciones e investigaciones en el campo de la astronomía durante los 27 años que estuvo en el cargo.
- Dirige y participa en tareas, gestiones y trabajos de campo y oficina encaminados a la obtención del mapa geográfico de Colombia, con el mérito de obviar serias limitaciones, propias de la carencia de una red geodésica y recurriendo a ingeniosos procedimientos, como el remplazo de vértices geodésicos por vértices astronómicos, referidos y fijados por coordenadas a las ciudades y poblaciones más importantes del país, y haciendo “cambios de señales entre el Observatorio Astronómico y las estaciones telegráficas de cada una de tales poblaciones”.
- Regenta la Escuela de Matemáticas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.



El matemático

Su vocación, interés y dedicación en este campo resultan correlacionados con el auge de las matemáticas en esa época en el mundo. Según el ilustre ingeniero don Julio Carrizosa Valenzuela, le corresponde a Garavito rescatar la escasa trayectoria científica y matemática que en Colombia habían configurado personajes como Mutis, Caldas, Codazzi, José Félix de Restrepo y Lino de Pombo.

Ya desde su época de estudiante de la Facultad de Ingeniería impartía “cátedra” a sus propios condiscípulos y recién graduado dicta la asignatura de Cálculo Infinitesimal. Son varios los trabajos especiales y publicaciones que se registran en el área de las matemáticas, tales como:

- En la cátedra de Cálculo Infinitesimal, aplica y desarrolla las enseñanzas de analistas franceses como Humbert, Appell, Cauchy y Jordan, así como del suizo Sturm. En este contexto, y en manuscritos suyos, resuelve ejercicios y problemas propuestos por Sturm.
- Ofrece dos soluciones a un problema de geometría presentado por el ingeniero Abel Bravo.
- Tesis de grado de profesor de Matemáticas, denominada “Forma de la sección meridiana de un manómetro de aire comprimido para que la graduación sea uniforme”, con ingenioso juego matemático. Previamente, en función de la tesis requerida, había hecho el trabajo conocido como “El juego de la aguja”, un ejercicio matemático de probabilidades. La tesis forma parte del limitado material de manuscritos de esta naturaleza conservado en la Biblioteca de Ingeniería de la Universidad Nacional, en el periodo 1891-1902.
- “Estudio sobre la Armadura Warren para puentes”, dentro de la formalidad para optar al título de ingeniero civil.
- Solución de problemas sobre cálculo de probabilidades.
- Trabajos varios matemáticos y subsidiarios, aclaratorios de ideas y conceptos, como la teoría de las funciones trascendentes enteras y series especiales, la teoría de la trigonometría plana no euclídea, a partir de su fórmula fundamental, y solución de ecuaciones de grado superior utilizando las propiedades de las raíces.

- Estudios sobre funciones elípticas, considerados de gran originalidad e interés didáctico.
- Estudio sobre teoría de conjuntos.
- Monografía sobre las covariantes algebraicas de las formas binarias, dentro de un trabajo presentado en el Tercer Congreso Latinoamericano, celebrado en Río de Janeiro en 1905 (Julio Carrizosa, El Centenario).
- Presenta el tema “Cuarto del cuestionario de matemáticas (primera parte). Juicio crítico sobre una memoria científica”, en el Congreso Científico Latinoamericano.

El ingeniero

En su condición de ingeniero egresado de la Universidad Nacional, y ante el llamado que se le hace en 1902, en plena guerra civil de los Mil Días, contribuye a la reorganización de la Facultad de Ingeniería, que estaba en receso. Toma importantes decisiones relacionadas con el Observatorio Astronómico e investigaciones por emprender bajo su tutela, esquema al cual incorpora a distinguidos ingenieros, como Jorge Álvarez Lleras y Belisario Ruiz Wilches.

En el marco de estas destacadas facetas de su personalidad, logros y contribuciones, Garavito se desempeña en los siguientes frentes:

- **1892.** Lo nombran director del Observatorio Astronómico, cargo que ocupó durante cerca de 27 años. Allí realiza sus trabajos más sobresalientes en materia de observaciones meteorológicas, cálculo de efemérides, cálculo de la latitud de Bogotá y tablas de la Luna.
- **1902.** Crea la Oficina de Longitudes, para determinar con exactitud las coordenadas de las principales ciudades de país e impulsar la producción de cartas geográficas y la fijación de fronteras patrias.
- Miembro de la comisión asignada para precisar y trazar los límites con Venezuela (laudo arbitral de la corona española de 1891).
- **1916.** Encargado de la presidencia de la Sociedad Colombiana de Ingenieros (SCI), a la muerte de Alejo Morales.
- **1897.** Lo nombran director de *Anales de Ingeniería*.
- **1916.** Presidente en propiedad de la SCI.

El profesor

Numerosos testimonios de sus contemporáneos, particularmente de sus discípulos, coinciden en afirmar que “Don Julio”, como usualmente lo llamaban, era un excelente profesor, gran expositor, con estilos propios y originales, que hacía gala de ello en sus demostraciones y soluciones hábilmente llevadas al tablero en sesiones de clase, o a sus cuadernos y escritos.

Esos atributos se reflejan dentro de numerosos folletos y publicaciones, principalmente en el contexto de *Anales de Ingeniería*, publicación oficial de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, a la cual estuvo íntimamente vinculado.

Algunos colegas y amigos suyos consideran que la faceta de profesor fue, en verdad, una de las más sobresalientes de su prolífica existencia. Biógrafos como Lleras Codazzi, Álvarez Lleras, Víctor Caro, han insistido en este aspecto de su personalidad como el más interesante, al destacar al maestro, al profesor universitario, frente al discípulo, cuya habilidad y espíritu de investigación habrá de desarrollar. Esos mismos biógrafos, a más de otros testimonios reconocen que Garavito ya había sido profesor de sus propios condiscípulos, a quienes ampliaba las explicaciones recibidas en varias cátedras y expresaba sus propios criterios.

Su vocación por la enseñanza se hace manifiesta desde un comienzo, pues tan pronto como recibe sus títulos en la Universidad Nacional asume variadas asignaturas, ya mencionadas en estas notas.



Observatorio
Astronómico de
Bogotá.

El astrónomo

Este perfil, el más destacado dentro de su trayectoria, puede identificarse y ponerse de relieve, muy explícitamente, al enfatizar que Garavito fue, durante 27 años, la última mitad de su vida, el director del Observatorio Astronómico Nacional. Esto explica que una parte muy significativa de su obra se refiera a trabajos, investigaciones, artículos y temas relativos a la astronomía, dentro de la cual, además, contribuye a la formación de ingenieros en esa área.

Algunos trabajos sobre astronomía

En este frente, el de más alto reconocimiento y logros de su prolífica existencia y el alcance de estas notas, se resumen algunas de sus más destacadas contribuciones en este campo, así:

- **Geodesia Astronómica**

Dirección de la organización de la Oficina de Longitudes y, dentro de ella, el desarrollo de métodos de observación y reducción de las observaciones, con el fin de optimizar el uso de los modestos instrumentos disponibles. Así mismo, la dirección de los estudios sobre desviación de la vertical en Facatativá.

- **Estudios sobre el movimiento de la Luna**

Estos estudios, emprendidos por Garavito de manera sostenida desde 1906, han sido, según los expertos, una de las “grandes tareas de la astronomía matemática”, y rematan con su obra monumental, *Las tablas de la Luna*, en 1920. Sus estudios, apoyados en formulaciones de la mecánica celeste y ecuaciones de Hill canónicas, respondían a una coyuntura y un complejo problema de la época, respecto al movimiento y órbita de la Luna y su importancia en la navegación marítima, junto con la posición de las estrellas. Las investigaciones más reconocidas entonces sobre el movimiento de los planetas eran las de Jacobi, Hamilton, Poincaré, Keverrie y Newcomb. Según Jorge Arias de Geiff, “Garavito dedujo por los métodos que le eran propios y de manera directa las ecuaciones de Hill, referidas al movimiento de la Luna supuesta su masa despreciable, atraída por la Tierra y el Sol, en un sistema de coordenadas rectangulares giratorio con centro en la Tierra y uno de cuyos ejes está siempre dirigido hacia el Sol. Si se desprecian la inclinación de la órbita lunar, la

excentricidad de la órbita terrestre, el paralaje solar, estas ecuaciones tienen una solución periódica de las llamadas de primer género, estudiadas a fondo por Poincaré. Esta solución periódica, un óvalo simétrico con respecto a los ejes X y Y , fijo con respecto al sistema de coordenadas y que por lo tanto gira con él, y que apenas es una idealización del movimiento de la Luna, tiene importancia, como punto de partida de una teoría lunar, en el hecho de que incluye ya la parte más importante de las perturbaciones solares, aquellas que dependen únicamente de la relación entre el movimiento medio del Sol y la diferencia entre el de la Luna y el del Sol, una relación conocida con grandísima exactitud. La solución obtenida allí es la llamada curva u órbita variacional.

“Garavito logra, con lujo de detalles, esta solución periódica, obteniendo los coeficientes mediante desarrollo según las potencias pares de ‘ m ’ hasta la décima segunda, llevando así el estudio más allá de lo empleado en la teoría de Brown.

“Pero esto era apenas el comienzo: de los incontables términos necesarios de ser incluidos en una teoría lunar, el Dr. Garavito sólo alcanzó a iniciar el estudio del movimiento de nodo, cuando la muerte lo interrumpió, hoy hace 45 años, lo que debería haber sido la coronación de su obra. El trabajo de Garavito ‘Fórmulas definitivas para el cálculo del movimiento de la Luna...’ aparece citado en el reciente tratado de mecánica celeste de los profesores Brouwer y Clemence, director del Observatorio de Yale, el primero, y director científico del Observatorio Naval de Washington, hasta hace poco, el segundo”.

Esta parte del recuento corresponde al escrito del ingeniero Jorge Arias de Geiff, dentro de las conmemoraciones del primer centenario del nacimiento de Julio Garavito (1865 - 1965).



- **Observaciones al cometa de 1901**

En abril de 1901 se observó en Colombia un brillante cometa y Garavito pudo hacer tres observaciones con teodolito y cronómetro de bolsillo para determinar su órbita, cuyos cálculos se publicaron y adicionaron con una exposición sobre el método de Olbers, relativo a cálculos de elementos de una órbita cometaria. Tal observación y las hechas más adelante con el cometa de 1910 sirvieron de base para profundizar sus trabajos y exposiciones sobre mecánica celeste. Estas observaciones, registros y resultados se consignan en la publicación acogida por el Observatorio Astronómico Nacional, editada por la Imprenta Nacional en ese mismo año.

Así se introduce la publicación:

“La presente publicación contiene una primera aproximación de los elementos parabólicos de la órbita del brillante cometa de abril y mayo de este año, calculada sobre tres observaciones efectuadas con un teodolito y un cronómetro de bolsillo. Ella puede ser útil para los que quieran hacer el cálculo definitivo de la órbita basado sobre el conjunto de las observaciones de precisión efectuadas en el mundo. Aprovechamos, por otra parte, esta oportunidad para hacer una exposición elemental y metódica del método de Olbers referente al cálculo de los elementos de una órbita cometaria, que creemos sirva a los que deseen conocer esta clase de operaciones sin necesidad de hacer largos estudios”.

Esto permitió obtener los elementos de la órbita del cometa y proponer el método de Olbers para la determinación de una órbita cometaria (artículo de Jorge Arias de Greiff).

Así comentaba Julio Garavito, como complemento a su escrito: “Suplicamos a los observadores a quienes llegue este opúsculo, tengan la galantería de enviarnos las observaciones que hayan hecho del cometa I de 1901, a Bogotá, República de Colombia, apartado número 390; por cuyo servicio les quedaremos profundamente reconocidos. Hasta el presente sólo han llegado a nuestro conocimiento las publicadas en el *Bulletin de la Société Astronomique de France*, números de mayo, junio, julio y agosto de 1901, que reproducimos a continuación”.

- **Observación del eclipse total de sol en 1916**

Para la observación de este fenómeno, visible en Colombia, en una franja que incluyó a Medellín y

Bucaramanga, Garavito organizó una expedición a Puerto Berrío, en compañía de un distinguido grupo de ingenieros, entre los cuales se encontraban Jorge Álvarez Lleras, Julio Garzón Nieto y Santiago Garavito. Una extensa memoria de la observación del eclipse, elaborada por Garavito y Álvarez, se publicó en *Anales de Ingeniería* de ese año.

Otros estudios astronómicos

A continuación, algunos estudios sobre astronomía dinámica, sobresalientes dentro de sus investigaciones en este campo:

- Estudios varios sobre mecánica celeste.
- Cálculo de la hora y azimut de la hora del orto de Venus para el 8 de enero de 1891.
- Datos meteorológicos recopilados desde el Observatorio.
- Estudio sobre la determinación de la altitud de Bogotá
- Serie de observaciones para determinar la latitud del Observatorio de Bogotá.
- Contribuciones al plan para la elaboración de la carta del país, levantada por medios astronómicos.
- Estudio sobre la desviación de la plomada en Facatativá a causa de la atracción de la cordillera.
- Presentación del método de Olbers para la determinación de una órbita cometaria.

Algunos escritos especiales

Entre los documentos que la Escuela ha tratado de recuperar y organizar alrededor de los recopilados para celebrar el centenario del nacimiento de Julio Garavito, disponibles en su biblioteca, se han encontrado los siguientes:

- *Principios de dinámica de los fluidos*, traducción de la original en francés llamada *Principes de la dynamique des fluides*, publicada en 1895 en la Imprenta de Vapor de Zalamea Hermanos.
- *Óptica astronómica. Teoría de la aberración de la luz*, publicada en 1912 por la Imprenta del Estado Mayor General, para lo cual se apoya en unas memorias del profesor David Gill, director del Observatorio del Cabo.
- *La paradoja de la óptica matemática*, publicada en 1916 por la Imprenta Nacional, en el ámbito de la teoría

de la aberración y de la refracción de la luz, con versión en francés (*Le paradoxe de l'optique mathématique*), dentro de la cual, a partir de un conjunto de leyes sobre la propagación de la luz, cuestiona y trata de explicar por qué aquello que se considera como una “solución ilusoria” ha originado “una de las paradojas más rebeldes que se han presentado a la ciencia”.

- *Nota sobre óptica matemática*, publicada en 1913 en los Talleres del Estado Mayor General. Constituye una crítica de la hipótesis ondulatoria, con explicaciones sobre “Algunos fenómenos ópticos que se relacionan con la Astronomía - Aberración y Refracción”.
- *Nota sobre las geometrías planas no euclidianas*, publicada por Águila Negra Editorial en 1918, y tomados de *Anales de Ingeniería*, números 299, 300, 301 y 302.
- *Nota sobre la dinámica de los electrones*, publicada por la Imprenta de Casís en 1922, cuando ejercía como profesor de Mecánica Racional y otras asignaturas en la Facultad de Matemáticas de Colombia.

Otros trabajos especiales

Buena parte de sus estudios e investigaciones se publicaron en *Anales de Ingeniería*, de los cuales se citan los siguientes:

- **Marzo de 1890.** Su primera publicación, cuando aún era estudiante, trata la solución de un problema de geometría, presentado por el profesor Abel, para el cual plantea, con gran rigor matemático, dos soluciones.
- **Enero de 1891.** Publicación relacionada con el cálculo de la hora y azimut del orto de Venus, para el 8 de enero de ese año, en Bogotá.
- **Julio de 1891.** Estudio de tesis para cumplir con el requisito de grado como profesor de Matemáticas, el cual contiene una demostración del conocido “juego de la aguja”, consistente en considerar una serie de líneas paralelas equidistantes dibujadas en papel y arrojar sobre esas líneas una aguja de longitud igual a la distancia entre las paralelas. La solución se apoya en un teorema de Bernouilli sobre cálculo de probabilidades.
- Determinación de la manera de definir la sección meridiana de un manómetro de aire comprimido para lograr una graduación uniforme. Así se describe el procedimiento: “Para ello estableció la relación fun-

damental refiriéndose a una integral de una función desconocida que se determina por la eliminación entre la ecuación establecida y su diferencial, en vez de proceder como de ordinario, estableciendo una relación entre la diferencia de la función y la variable de que depende, integrando enseguida la ecuación diferencial”.

ALGUNOS HOMENAJES Y RECONOCIMIENTOS A SU VIDA Y OBRA

El país y sus instituciones, a lo largo de los años, han venido reconociendo la valía de este insigne colombiano y fijado su mirada sobre sus más destacadas facetas y contribuciones. Algunos reconocimientos se mencionan a continuación:

- **Edición de *Anales de Ingeniería*, N.º 325**

En 1920, año de su fallecimiento, la Sociedad Colombiana de Ingenieros dedicó este número de su principal órgano de difusión, dentro del cual se incluyó una biografía escrita por el ingeniero Jorge Álvarez Lleras.

- **Orden al Mérito Julio Garavito**

El 5 de enero de 1965, al cumplirse el primer centenario del nacimiento de Julio Garavito, la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, la Academia Colombiana de Historia, la Sociedad Geográfica de Colombia y la Universidad Nacional de Colombia, por conducto de la Facultad de Ingeniería y del Observatorio Astronómico, organizaron una sesión solemne, dentro de la cual se instaló el Consejo de la Orden al Mérito Julio Garavito, creada por el Congreso Nacional según la Ley 135 de 1963, para exaltar los valores de la ingeniería y de los ingenieros colombianos



Orden al Mérito
Julio Garavito.

- **El cráter Garavito de la Luna**

Como respuesta a consultas de nivel mundial, la propuesta del Observatorio Astronómico de Bogotá, en su condición de Comité Nacional de Astronomía de Colombia, la acogió la Unión Astronómica Internacional, asociación que reúne a la comunidad astronómica mundial, encargada entre otras de la nomenclatura del sistema solar. En su reunión de Brighton (Inglaterra), el 27 de agosto de 1970, aceptó el nombre de Garavito para bautizar un cráter de la Luna en su cara oculta. Tiene 80 kilómetros de ancho y está localizado en las coordenadas latitud 47°6 sur y longitud 156°7 este. En la actualidad, cinco cráteres llevan los nombres Garavito y se identifican como S, C, D, Q, Y.



- **La estampilla**

Los Correos de Colombia le rindieron un homenaje especial, mediante la impresión y circulación de una estampilla de 4 centavos, en el año 1949.

- **El billete de \$20.000**

El Banco de la República, en 1996, pone en circulación el billete de esta denominación.

Aparece, en el anverso, el rostro del prestigioso ingeniero, con una imagen de la Luna llena, y en el reverso, una vista de la Tierra tomada desde la Luna, una imagen del Observatorio Astronómico de Bogotá y figuras geométricas varias.

- **Busto en los Jardines del Observatorio Astronómico de Bogotá**

Hoy se encuentra inserto en el área adyacente a la Casa de Nariño, sede de la Presidencia de la República.

- **La Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, fundada en 1972**

Mediante Acta de Constitución de 20 de octubre de 1972 se fundó la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, con el fin de formar ingenieros, según su propia Declaración de Principios. Al asignársele este nombre se rindió un homenaje más al ilustre personaje, preclaro representante de la ingeniería colombiana.

- **Otros bustos en bronce**

Uno de ellos preside el acceso a la sede de la Sociedad Colombiana de Ingenieros en Bogotá (Presidencia de Alfredo Bateman y discurso a cargo de Julio Carrizosa Valenzuela, entonces rector de la Universidad Nacional de Colombia).

Otro, más reciente, preside el patio interior del bloque C de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

- **Homenaje de la Universidad Javeriana**

Tuvo lugar en sesión solemne de la Sociedad Colombiana de Ingenieros, el 4 de junio de 1993.

- **Sesión del 23 de abril de 2009 en la Escuela Colombiana de Ingeniería**

Espacio consagrado por la Escuela en el contexto del Año Internacional de la Astronomía, declarado por las Naciones Unidas y en el marco de la semana de ECIciencia de la Escuela. Este evento, que constituye la “expresión del ingenio científico cultural e interuniversitario”, creado en 1989, protocolizó un nuevo, merecido y especial tributo a la memoria del esclarecido colombiano.

Conmemoración Centenaria Julio Garavito 1920-2020, por los cien años del fallecimiento del personaje, con un conjunto de actos, ceremonias, publicaciones y homenajes programados dentro de un esquema interinstitucional coordinado por la Universidad Nacional de Colombia, del cual formó parte la Escuela Colombiana de Ingeniería, particularmente en la programación de la cátedra Julio Garavito 2020.

REFERENCIAS

- Duque Escobar, G. (2009, abril). Artículo suplemento *El Tiempo*. Ministerio de Obras Públicas (s.f.). Publicaciones Centenario de Julio Garavito Armero, 1865-1965.
- Anales de Ingeniería* (1997). *Garavito, gloria de la ingeniería colombiana*, CV (868).
- Biblioteca Escuela Colombiana de Ingeniería. Compilación de publicaciones y artículos especiales contenidos en volúmenes 1, 2 y 3 (R510.51 G 212).
- Nueva Historia de Colombia* (1993). Bogotá: Planeta.
- Wikipedia.
- Arias de Greiff, J. (s.f.). *Julio Garavito. Vida y obra*.
- Garavito Silva, G. (s.f.). *La vocación científica de los Garavito*.
- Sánchez, C.H. (2019). *Matemáticas en Colombia en el siglo XIX*.

REVISTA DE LA 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 bibliografía sobre un tema en particular.

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

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

Requisitos para la publicación de artículos

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

Scope and policy

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

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

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

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

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

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

Ruling for publication

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



Confía en 4-72,
el servicio de envíos
de Colombia

Línea de atención al cliente:
(57 - 1) 472 2000 en Bogotá
01 8000 111 210 a nivel Nacional

.....
www.4-72.com.co