



02  
Abril - junio de 2014

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000,00

Tarifa postal reducida N.º 2014-107 4-72  
Servicios Postales Nacionales S.A.  
Vence 31 de diciembre de 2014 - ISSN 0121-5132

❑ Sistema de cimentación en placa-pilotes. Análisis de interacción suelo-estructura para un edificio de doce pisos y sótano en la ciudad de Bogotá.

❑ Factores que han contribuido al deterioro prematuro de los pavimentos asfálticos en las carreteras nacionales.

❑ Remoción de hierro en agua con alta concentración.

❑ Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes.

❑ Ecología de ríos y quebradas.

❑ Alternativas de solución al problema probabilístico en los puntos de convergencia de una red PERT.



REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

# Ingeniería

94

## CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**PRESIDENTE** GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS

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

**RECTOR** ROBERTO RÍOS MARTÍNEZ

**SECRETARIO** RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

## REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

**DIRECTOR** JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

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

**DIRECCIÓN EDITORIAL** CRISTINA SALAZAR PERDOMO

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

**DIRECCIÓN COMERCIAL** EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

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

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

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

# Contenido

## 5 / EDITORIAL

### Evaluación de la producción de las universidades

*Héctor Alfonso Rodríguez Díaz*

## 9-16

### Sistema de cimentación en placa-pilotes. Análisis de interacción suelo-estructura para un edificio de doce pisos y sótano en la ciudad de Bogotá

*Jaime Garzón Moreno - José Mauricio Moreno Silva*

De acuerdo con un proyecto arquitectónico de un edificio de uso residencial de doce pisos y un sótano, ubicado en la ciudad de Bogotá, se plantea una solución a la estructura al edificio utilizando un sistema estructural dual (pórticos en los dos sentidos y muros pantalla) que se cimentará sobre una fundación placa-pilotes, la cual se diseñará con las características de resistencia al corte no drenado y compresibilidad del suelo mencionados en el informe de suelos suministrado por el ingeniero Jorge Enrique Durán.

## 17-30

### Factores que han contribuido al deterioro prematuro de los pavimentos asfálticos en las carreteras nacionales

*Fernando Sánchez Sabogal*

La falta de un mantenimiento adecuado y oportuno ha incidido consuetudinariamente en el deterioro prematuro de los pavimentos de la red vial nacional; sin embargo, existen otros factores que, en conjunto, han prestado igual o mayor contribución y que, por no haberse atendido debidamente, han hecho que los recursos destinados a la construcción y a la conservación de la red vial nacional no se traduzcan en un mejor estado de ésta.

## 31-34

### Remoción de hierro en agua con alta concentración

*Jairo Alberto Romero Rojas - Leidy Katherine Cárdenas Real - Amparo Carolina Castañeda Jiménez*

Uno de los mayores problemas para obtener agua potable es la remoción de hierro en aguas de aljibes y pozos de agua subterránea. En este artículo se presentan los resultados del tratamiento del agua de un manantial con un contenido de hierro de 7,27 mg/L.

# Contenido

## 35-44

### Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes

*Camilo Eduardo Espinosa Ortiz - Jairo Alberto Romero Rojas*

En este artículo se analiza la factibilidad del diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales municipales de una población de 30.000 habitantes, en comparación con un sistema de lagunas de estabilización. Dentro del análisis se incluyen antecedentes del uso de humedades para el tratamiento de aguas residuales y algunos criterios de diseño.

## 45-58

### Ecología de ríos y quebradas

*Beatriz Gamboa Tillotson - Arturo Liévano León*

En este texto se explica brevemente la ecología de ríos y quebradas, y se tratan temas relacionados con las características de los principales componentes de estos ecosistemas, como la cuenca hidrográfica, su geología y su cobertura vegetal, los aspectos fisicoquímicos del agua y su biota. También se ofrece una disertación sobre la importancia de la biodiversidad y la conservación de estos ecosistemas únicos.

## 59-64

### Alternativas de solución al problema probabilístico en los puntos de convergencia de una red PERT

*Germán Eduardo Giraldo González*

Los autores del PERT (1958) y otros (como Malcolm et al., 1959) han adoptado los parámetros de la distribución beta para representar la duración de las actividades basándose en suposiciones de ajuste a la realidad, lo cual se ha aceptado debido principalmente a la “flexibilidad” de la distribución (Moder et al., 1967). Sin embargo, la adopción de estos parámetros (media y varianza) ha sido criticada por autores como Perry & Greig (1975), Moder & Rodgers (1968), y MacCrimmon & Ryavec (1962 y 1964), debido a la falta de exactitud, sobre todo cuando se analizan redes en las que las actividades presentan varios precedentes.

## 65 / ALCANCE Y POLÍTICAS

# Editorial

## Evaluación de la producción de las universidades

**HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ**

Profesor Titular de la Escuela.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co

La *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* se creó en junio de 1990. En el año 2003, de acuerdo con la notificación del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), se indexó en la categoría C, teniendo en cuenta que satisfacía las exigencias relacionadas con la calidad científica y la estabilidad contempladas en la categoría que se le asignó, de acuerdo con la convocatoria Actualización de Índice de Publicaciones Seriadas Científicas y Tecnológicas Colombianas, Publindex 2002.

Desde su creación fue una revista, indexada o no, en la que aparecieron artículos presentados por profesores y profesionales de sus grupos de investigación y de otras universidades, evaluados por pares –para su publicación, entre otras cosas–, tal como estaba establecido. Durante este periodo, el director de la revista y su comité editorial podrían ser todos profesionales de la institución a la cual pertenecía el medio impreso.

En los últimos cuatro años, los requisitos de Colciencias para mantener una revista indexada cambiaron; hoy en día, tanto el director como cada uno de los integrantes de su comité editorial deben ser profesionales, principalmente con un nivel de formación de doctor o superior. Además, en el comité editorial debe haber personas externas con nivel de formación de doctorado y un porcentaje de los artículos publicados ha de ser externo. Así las cosas, fue necesario encomendar la *Revista de la Escuela* a profesionales con este nivel de formación; sin embargo, el resultado no pudo ser más desalentador, ya que no sólo no se pudo mantener su

condición de revista indexada, sino que estuvo a punto de desaparecer por razones sobre las que no vale la pena ahondar, pero entre las que sí cabe mencionar unos requisitos que no tienen ninguna justificación.

Entonces la Escuela, entendiendo la responsabilidad derivada de la autonomía universitaria y de la necesidad de hacer conocer su producción intelectual, tomó la decisión –independientemente de los requisitos exigidos– de continuar editando su revista. Se dejaron a un lado estos requisitos inanes sobre las características de la dirección y el comité editorial, y se mantuvieron el rigor y la exigencia para la publicación de los artículos; por eso hoy se puede señalar con satisfacción que la *Revista* se puso al día con sus ediciones, aparte de que conserva su calidad y el reconocimiento de la comunidad.

Otro ejemplo que hay que mencionar corresponde al de la Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería, creada en el año 1994. La Editorial ha publicado hasta el momento 85 libros de ingeniería, administración y economía, producto de un concienzudo trabajo de investigación hecho por sus profesores. Sus libros tienen gran reconocimiento nacional e internacional, que se puede medir por el número de textos vendidos y por las consultas que les hacen de manera permanente a sus autores.

Lamentablemente, para el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación este trabajo serio y riguroso de la Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería, así como la calidad de sus libros publicados, no tienen ningún valor en su calificación.

En este orden de ideas, la Asociación de Editoriales Universitarias de Colombia (Aseuc) ha enviado una reciente comunicación a Colciencias sobre las convocatorias para registro de editoriales académicas 2013-2014, en la que expresa las preocupaciones sobre dicha convocatoria. Indica adicionalmente que “las convocatorias realizadas hasta la fecha presentan debilidades conceptuales e inconsistencias de aplicación de los criterios, que conducen a errores crasos de desconocimiento de los sellos editoriales”.

Y hago estas reflexiones a propósito de la última calificación de los grupos de investigación de diferentes universidades, realizada y presentada por Colciencias. Da la impresión de que no se ha evaluado la trayectoria de cada grupo y el trabajo efectuado. En su calificación, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación se ha limitado a evaluar la presentación de artículos en revistas indexadas, sobre todo internacionales, y el trabajo cofinanciado por Colciencias. Parece que la calificación es el resultado de una lista de chequeo, y esta es una forma simple y perjudicial de evaluar el trabajo que se realiza.

Si queremos mejorar el trabajo de investigación y la producción intelectual, y que esto de verdad beneficie especialmente al país, claro que resulta indispensable evaluar el trabajo de investigación que desarrolla cada grupo y cada universidad. Pero esta evaluación deben hacerla personas que puedan valorar la labor realizada, en la que se pueda determinar cómo se ha avanzado en el conocimiento, cuál es la aplicación efectiva de lo que se ha hecho—su impacto y beneficio para la sociedad—, la sostenibilidad económica de los grupos y cuánta riqueza han generado. Al fin y al cabo, estamos hablando del trabajo desarrollado por gente con las mayores oportunidades, con la más alta preparación científica y técnica, al igual que con el más alto potencial de generar riqueza y contribuir así al desarrollo efectivo de Colombia.

Estas personas, que tienen a su cargo establecer los criterios para evaluar el trabajo de investigación y que parece que se deslumbran con los cargos del Estado, no pueden seguir creando estas reglas y estableciendo unilateralmente cómo se evalúa; lo que deben hacer es dedicarse a investigar, si quieren ser pares de quienes con esfuerzo realizan algún trabajo de investigación. A fin de cuentas, para este trabajo es para el que los ha preparado especialmente la sociedad y tienen la obligación moral de retribuir esta inversión.

Y es que en Colombia, en particular, hay investigaciones de investigaciones y una simple mirada nos puede refrescar el panorama. El ejemplo es sencillo: cuántas de las llamadas investigaciones, financiadas bien sea por la universidad, por el Estado, o por la universidad y el Estado por intermedio de Colciencias, han tenido como resultado solamente un artículo en una revista, eso sí indexada; cuántas de estas investigaciones han tenido permanencia y se han convertido en investigaciones sostenibles, y cuántas le han dado fruto a la sociedad con aplicaciones directas y efectivas, tal como se desarrolla la investigación en los demás países. No creo que la publicación de un artículo en una revista indexada sea la mejor y única medida para evaluar el trabajo de un grupo.

Es bueno preguntar también cuántas de estas investigaciones las han patrocinado las entidades del Estado y la empresa privada para atender sus necesidades de manera efectiva. Si queremos mejorar en investigación y producción intelectual, ésta es la investigación que debemos realizar para asegurar la productividad, continuidad y sostenibilidad de los grupos. Los artículos son un resultado natural del trabajo desarrollado y no el medio para obtener un puntaje que califique la producción. Algunos dirán, simplemente, que eso es lo que exige la comunidad internacional y que entonces así tenemos que hacerlo.

Los grupos de investigación de Estados Unidos y Europa consiguen recursos de la empresa privada y de empresas del Estado, para resolver los problemas de éstas, que una vez solucionados van a generarle a la una o al otro resultados positivos. Así se debe entender la investigación. Aquí a este trabajo algunos lo llaman despectivamente consultoría y dicen que de ningún modo puede ser investigación. Son procedimientos y requisitos fijados por quienes, obtenido un título, se han dedicado únicamente a legislar ante la incapacidad de conseguir recursos e investigar, amparados en el presupuesto oficial que año tras año se les transfiere. Otra cosa es gestionar y conseguir recursos para que un grupo de investigación pueda avanzar en sus líneas de trabajo, no por una convocatoria de Colciencias sino por el interés de la empresa pública o privada, que confía en lo que se le propone gracias a la seriedad del trabajo presentado y desarrollado por el grupo.

Claro que también se cae en los excesos. Hay universidades estatales que por culpa de los denominados

convenios interadministrativos se dedican, sin tener la infraestructura ni los recursos humanos y técnicos necesarios, a crear oficinas paralelas incluso fuera de su campus y mediante profesionales temporales realizan el trabajo, muy regular, que deberían hacer las empresas.

No se entiende cómo una obra, los capítulos de un libro o un artículo no tienen ningún valor si no son producto exclusivamente de una investigación definida con base en unos parámetros poco sustentables. Por qué se cree que un libro dirigido a los estudiantes de pregrado o posgrado no es el resultado de una investigación, esa sí de largos años y muchas veces gracias al trabajo del profesor o los profesores en sus ratos libres, fruto de su experiencia investigativa, aplicada, y de una recopilación bibliográfica exhaustiva. ¿Por qué no tiene valor alguno el trabajo que se desarrolla en una especialización o en el pregrado?

La investigación no se puede hacer para que sólo obtengan puntaje las personas con el más alto nivel de

formación, pues lo ideal sería que ellas participaran en igualdad de condiciones con los demás profesionales. La investigación no puede ser excluyente. Es bien sabido que cuando alguien se dedica a investigar se desprende de los títulos y éstos poco cuentan; el trabajo de investigación, el que debe reconocerse cuando se evalúa, sólo se debe hacer para aportarle a la sociedad y, obviamente, al conocimiento.

Como bien lo expresó alguien al comentar estos resultados que Colciencias ha presentado, es como desconocer el trabajo del nobel García Márquez porque durante los últimos cinco años, a causa de su estado de salud, no escribió o escribió muy poco, y adicionalmente no tiene un título profesional. No obstante, vale la pena recordar que publicó en editoriales que en ningún caso son reconocidas por Colciencias. Así estamos con estas calificaciones y acreditaciones por culpa de la suprema inspección y vigilancia.

# Sistema de cimentación en placa-pilotes. Análisis de interacción suelo-estructura para un edificio de doce pisos y sótano en la ciudad de Bogotá

Piled-raft foundation system. Analysis of soil-structure interaction for a twelve-story building with a basement in the city of Bogota

JAIME GARZÓN MORENO<sup>1</sup> - JOSÉ MAURICIO MORENO SILVA<sup>2</sup>

1. Profesor del programa de Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Ingeniero civil y magíster en Ingeniería Civil con énfasis en geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

jaime.garzon@escuelaing.edu.co - josema.moreno@ecopetrol.com.co

Recibido: 20/12/2013 Aceptado: 10/01/2014

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

## Resumen

De acuerdo con un proyecto arquitectónico de un edificio de uso residencial de doce pisos y un sótano, ubicado en la ciudad de Bogotá, se plantea una solución a la estructura al edificio utilizando un sistema estructural dual (pórticos en los dos sentidos y muros pantalla) que se cimentará sobre una fundación placa-pilotes, la cual se diseñará con las características de resistencia al corte no drenado y compresibilidad del suelo mencionados en el informe de suelos suministrado por el ingeniero Jorge Enrique Durán. Este diseño comprenderá la capacidad admisible de la fundación y cálculo de los asentamientos elásticos y de consolidación (por métodos tradicionales “Terzaghi y Reséndiz”), y una vez encontrados los valores anteriores se procede a estimar los resortes (método de Winkler) para la fundación a corto y largo plazo, para luego introducirlos al modelo y generar el análisis interacción suelo-estructura a corto y largo plazo.

Este modelo final (interacción suelo-estructura) se compara con el modelo inicial (base empotrada) para ver cómo cambian la rigidez, diagramas de acciones internas (momentos, cortantes y axiales) de las vigas columnas, placa y pantallas entre estos dos modelos; también se revisará la estabilidad del edificio ante fuerzas horizontales.

**Palabras claves:** rigidez, deflexión, interacción suelo-estructura, cargas verticales.

## Abstract

According to an architectural design of a residential twelve-story building with a basement located in Bogotá, a solution is suggested to the building structure using a dual structural system (two-way portals and slurry walls) built on piled-raft foundations, which will be designed by the characteristics of undrained shear strength and compressibility of soil mentioned in soils report provided by engineer Jorge Enrique Duran. This design includes the carrying capacity of the foundation and calculation of the elastic and consolidation settlements (by traditional methods “Reséndiz and Terzaghi”); once found the above values, we proceed to estimate the springs (Winkler method) for short and long term founding, and then introduce the model and generate the soil-structure interaction analysis in short and long term.

This final model (soil-structure interaction) is compared against the original model (recessed base) to compare the changes in stiffness, internal actions diagrams (moment, shear and axial) of the beams, columns, raft and screens between these two models; the stability of the building against horizontal forces will also be reviewed.

**Keywords:** stiffness, deflection, soil-structure interaction, vertical loads.



## INTRODUCCIÓN

La interacción suelo-estructura es un procedimiento de modelamiento utilizado por los ingenieros estructurales para revisar la rigidez y las deflexiones de la fundación al apoyar la estructura sobre un suelo. Su análisis es fundamental para determinar los momentos flectores, fuerzas cortantes y asentamientos en los elementos estructurales que componen la cimentación, lo cual es posible si se cuenta con un buen estudio de suelos en el que se detallan la capacidad admisible y los asentamientos totales de la fundación al cargar el suelo con el peso de la estructura.

A lo largo de este artículo se mostrará un procedimiento para hacer un análisis de interacción suelo-estructura en un edificio de uso residencial apoyado sobre un suelo cohesivo, utilizando el modelo tipo Winkler (simular el suelo como una cama de resortes). Este método necesita dos parámetros: la capacidad portante y el asentamiento total de la fundación. Normalmente, en las oficinas de diseño de edificios no se hace este análisis de interacción suelo-estructura debido a que en los informes de suelos no se realiza un cálculo detallado en materia de asentamientos; por tanto, no se recomiendan valores acertados de los resortes que se deben asignar al modelo de interacción suelo-estructura, y el calculista termina haciendo su modelo empotrado en su base, que no es la condición de apoyo más real de una estructura.

## MARCO CONTEXTUAL

Las deflexiones y la rigidez de un elemento estructural de fundación, la distribución de presiones en el contacto fundación-suelo, así como las deformaciones del suelo de soporte, están vinculadas en una condición de interdependencia de efectos que se acostumbra denominar interacción suelo-estructura. Su análisis es fundamental para el diseño porque para determinar los momentos flectores y fuerzas cortantes se requiere conocer la distribución de presiones de contacto fundación-suelo.

La función esencial de una fundación es transmitir la acción de las cargas, concentradas o repartidas, sobre el suelo o roca de soporte en condiciones de seguridad y asentamientos tolerables. En el contacto del suelo y la base del elemento estructural de fundación se movilizan presiones  $q$  que constituyen la reacción del suelo a las cargas transmitidas. Tal presión de reacción del

suelo genera asentamientos a éste, al igual que acciones internas en los elementos estructurales de la fundación, como momentos flectores, cortantes y deflexiones, que son variables en el tiempo debido a la compresibilidad del suelo.

Una vez conocidos estos momentos flectores y fuerzas cortantes, se procede a diseñar los elementos estructurales (dimensiones y cantidad de refuerzo). Por lo anterior es muy importante determinar una distribución razonable de la mencionada presión  $q$ ; la forma de distribución de las presiones de contacto depende de varios valores, tales como:

- Grado de rigidez de la fundación.
- Forma o disposición de la fundación.
- Tipo de suelo.
- Distribución de cargas aplicadas.

Es una propiedad estructural que depende de la relación esfuerzo vs. deformación, que depende a su vez del tipo de suelo sobre el cual se apoya la estructura; esta propiedad también depende de la forma, longitudes y áreas de contacto de la estructura sobre el suelo. Una fundación rígida bajo carga exhibe variación lineal de las deflexiones, mientras que una fundación flexible no ofrece resistencia a flexión y su forma deflectada sigue todas las depresiones del contacto de la fundación con el suelo de soporte. Una medida de interacción en suelos de comportamiento elástico (suelos cohesivos) entre la fundación y el suelo de soporte la proporciona la denominada longitud característica, que crece en la dirección menor a mayor rigidez y es función de la rigidez relativa fundación-suelo.

Siempre que sea posible, es ventajoso usar fundaciones de forma regular. Para la mayor parte de los casos prácticos las formas usuales son la circular, la cuadrada, la rectangular o la trapezoidal.

**Suelos cohesivos.** Limos y arcillas saturadas exhiben muchas veces un módulo elástico constante, relativamente independiente del régimen de esfuerzos en la masa de suelo. En estas condiciones se puede modelar razonablemente bien para su análisis como un medio elástico homogéneo. Por tanto, si se pueden ignorar los efectos de consolidación en el tiempo, una fundación sobre tal suelo se puede analizar mediante la teoría elástica.

**Suelos no cohesivos.** Gravas y arenas tanto secas como sumergidas, al soportar una fundación sobre

ellos exhiben una respuesta no modelable mediante la teoría elástica, principalmente porque el módulo elástico depende en forma compleja del régimen de esfuerzos. Por ello, en los análisis de fundaciones se debe recurrir a enfoques empíricos, basados en observaciones del comportamiento de obras reales en el terreno.

**Modelo tipo Winkler**

El suelo de soporte de un cimiento es en realidad un continuo, generalmente ni homogéneo ni isotrópico. Sin importar que el mismo suelo se presenta bastante uniforme hasta gran profundidad, el crecimiento de la presión geostática (por peso del terreno) con ésta hace que la rigidez del material aumente con dicha profundidad. Condiciones como las anteriores, entre muchas otras cosas, son motivos por los cuales no se dispone en general de un modelo que permita describir en términos estrictos el comportamiento de un material real de fundación tan complejo como el suelo; no obstante, para fines de diseño y en determinadas condiciones particulares, es posible utilizar modelos que permiten hacer predicciones satisfactoriamente aproximadas, para fines prácticos, de tal comportamiento. En la variedad de tipos de modelos propuestos para representar la respuesta del suelo de soporte con diversas estructuras de fundación, el atribuido usualmente a Winkler ha recibido la mayor aceptación y ha sido el más utilizado en la práctica corriente de diseño. En efecto, este modelo tipo Winkler constituye un modelo mecánico que permite involucrar la respuesta del suelo de soporte en la solución del problema de interacción fundación-suelo. En él se supone que la presión  $p$ , que actúa en un punto de la interfaz fundación-suelo, es una función lineal de la deflexión  $y$ , del terreno en el mismo punto, cuya constante de proporcionalidad,  $K_o$ , permite expresarla así.

$$P = K_o y$$

**Ecuación diferencial de una viga sobre una fundación modelo tipo Winkler**

De acuerdo con los principios de la mecánica estructural, en una viga prismática se cumple la siguiente relación entre el momento flector  $M$ , la rigidez  $EI$  y la segunda derivada de la deflexión,  $y$ , de la elástica con respecto a la abscisa,  $x$ :

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \text{ Además, } V = \frac{dM}{dx} \text{ y } q = \frac{dV}{dx}$$

Donde  $V$  es la fuerza cortante. Si se supone la hipótesis de Winkler de proporcionalidad entre esfuerzos y deflexiones:

$$q = -ykB$$

Se obtiene la ecuación diferencial de la viga sobre una fundación modelo tipo Winkler.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + ky = 0$$

La solución general de la ecuación diferencial se puede expresar como

$$y = (C_1 \cos \lambda x + C_2 \text{sen} \lambda x) e^{\lambda x} + (C_3 \cos \lambda x + C_4 \text{sen} \lambda x) e^{-\lambda x}$$

Que resulta ser función de un parámetro  $\lambda$  cuya expresión es:

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{BK_s}{4EI}}$$

**Tabla 1**

Tabla de identificación de vigas de fundación de acuerdo con intervalos de la relación  $\lambda L$  y criterios para determinar la distribución de presiones de contacto

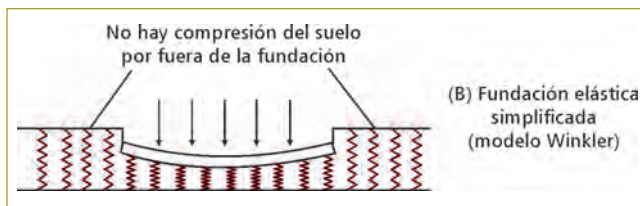
Intervalo de $\lambda L$	Identificación de la viga	Criterio para la distribución de la presión de contacto
$\lambda L < \frac{\pi}{4}$	Viga rígida	Distribución lineal de la presión
$\frac{\pi}{4} \leq \lambda L \leq \pi$	Viga de flexibilidad intermedia	Determinarla como viga sobre fundación elástica
$\lambda L > \pi$	Viga flexible	Determinarla como viga sobre fundación elástica

De la expresión  $P = K_o y$  para la hipótesis de Winkler se puede despejar el módulo de reacción del terreno, también conocido como coeficiente balasto,  $K_s$ , como la relación entre dicho esfuerzo  $P$  y la deflexión vertical correspondiente.

$$K_s = \frac{P}{y}$$

De esta definición se desprende también que  $K_s$  es el esfuerzo que produce un asentamiento unitario. Si los esfuerzos normales son suficientemente moderados, en el sentido de estar por debajo del umbral a partir del cual empiezan a presentarse deformaciones plásticas en el suelo, se puede presumir una cierta dosis de idealización, que existe proporcionalidad entre esfuerzos y deflexiones y el coeficiente de balasto sería una constante de proporcionalidad.

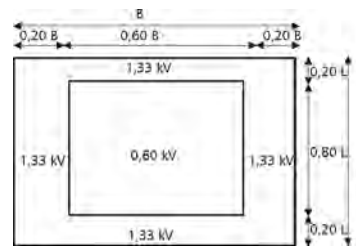
Conviene destacar que el modelo de comportamiento del suelo bajo carga, caracterizado por el módulo de reacción del terreno, difiere de un comportamiento elástico propiamente dicho. Se supone que el suelo actúa como un medio de resortes, donde la deflexión en un punto sólo depende del esfuerzo en dicho punto; un símil corriente lo constituye una cama de resortes (figura 1).



**Figura 1.** Esquema de la hipótesis del modelo tipo Winkler Vargas (1999).

### Determinación del módulo de balasto para el sistema de fundación placa-pilotes

Después de determinar qué porcentaje de esfuerzo vertical va a tomar el grupo de pilotes, y conociendo los asentamientos totales del edificio, se determina un valor de  $kV = q_u / \Delta s$ . Donde  $q_u$  es el esfuerzo último que resiste el grupo de pilotes y  $\Delta s$  es el asentamiento total de la edificación. Según recomendaciones de autores, se aconseja distribuir este módulo de balasto de la siguiente manera:



### METODOLOGÍA Y MODELAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Para este estudio se tomó un proyecto arquitectónico de un edificio residencial de doce pisos y un sótano, ubicado en Bogotá, en la zona lacustre 200, según la microzonificación sísmica de esta ciudad. El sistema estructural de la edificación es un sistema dual, compuesto por pórticos en los dos sentidos y unas pantallas que colaboran con la rigidez de la estructura a fuerzas horizontales.

Se realizaron tres modelos: uno empotrado en la base de las columnas y muros, en tanto que los dos modelos restantes poseen la placa de fundación y sus correspondientes resortes, que simulan los pilotes que están trabajando a la falla. Los elementos estructurales, como muros, columna, vigas y losa de torta superior, se modelaron en el programa; las cargas muertas adicionales, como afinadas y muros, se modelaron como carga muerta adicional, mientras las cargas vivas se asignaron al modelo, según especificaciones de la NSR-10. En cuanto al modelamiento del sismo, se hizo el procedimiento de análisis espectral respetando los requerimientos de la NSR-10. Para el cálculo de la capacidad admisible del sistema de fundación, se tomaron las reacciones del modelo empotrado y con esto se procedió a hacer las recomendaciones de la cimentación.

Para la determinación de los resortes se calculó la capacidad portante del sistema placa-pilotes de acuerdo con la metodología de Meyerhof, para placas y grupo de pilotes, teniendo en cuenta que los pilotes están trabajando a la falla y toman la carga no compensada del edificio. Trabajando la placa al 35 % de la carga, los pilotes toman el 65 % restante del peso total de la edificación. Los asentamientos se calcularon según la metodología de Terzaghi.

Conociendo los resortes de la condición a corto y largo plazo, se asignan a los modelos de interacción suelo-estructura, a corto y largo plazo. Con estos tres modelos se procede a hacer un análisis de resultados.

### Modelo 3D

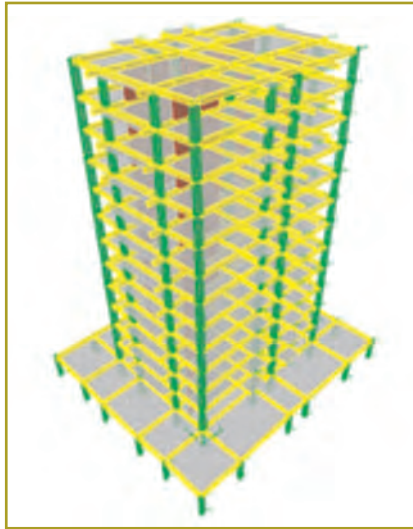


Figura 2. Modelo 3D empotrado.

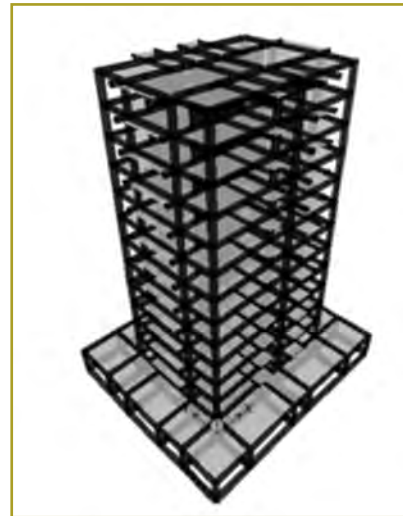


Figura 3. Modelo interacción suelo-estructura.



Figura 4. Proyecto arquitectónico.

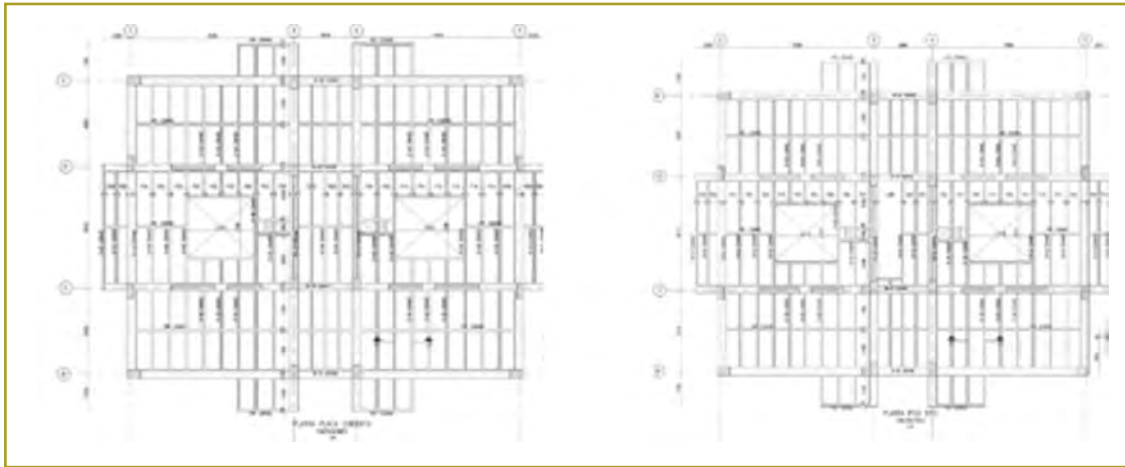


Figura 5. Plantas estructurales placa piso tipo y cubierta.

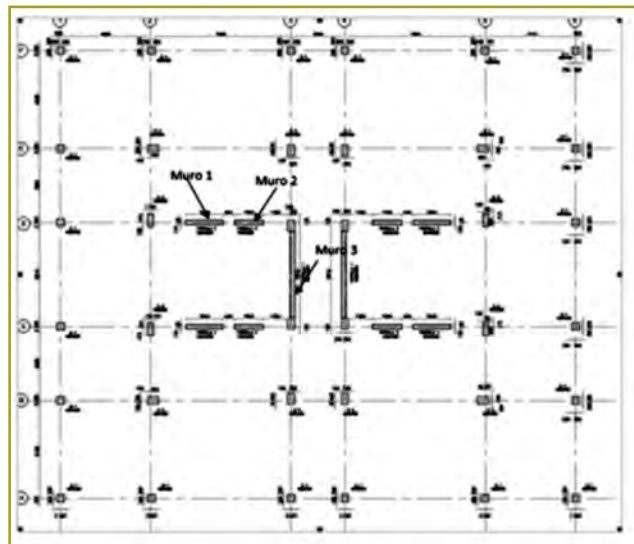


Figura 6. Planta localización de columnas.

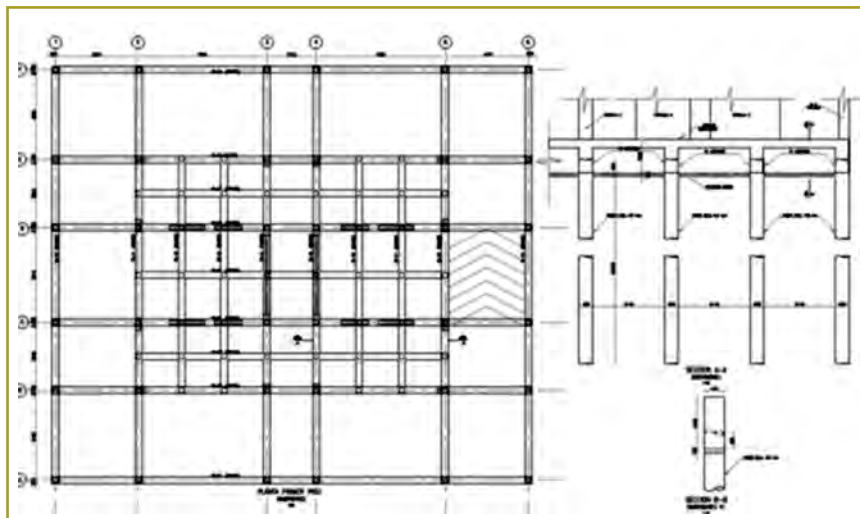


Figura 7. Planta de cimentación.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Revisión de la rigidez de los modelos

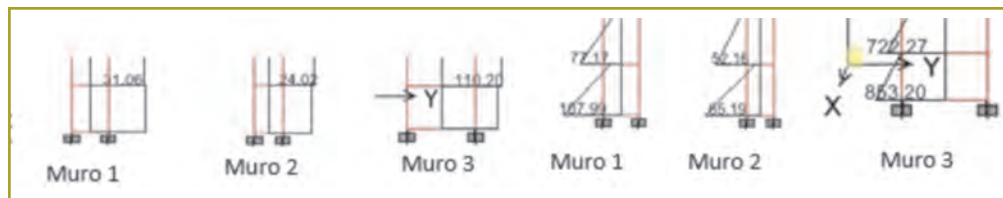
El modelo empotrado posee una mayor rigidez en comparación con los otros dos modelos de interacción suelo-estructura. La unidad de medida de comparación de rigidez de los tres modelos es la deriva máxima del edificio. Para el primer modelo el índice de deriva es de 0,5 %, para el segundo modelo el índice de deriva es del 1,6 % y para el tercer modelo el índice de deriva es del 1,8 %. Esto nos hace pensar que las estructuras de edificios que se diseñan todos los días no son tan rígidas como pensamos y que tienden a ser más flexibles cuando éstas se someten a fuerzas horizontales (fuerzas de sismo). Por consiguiente, se aconseja hacer análisis de interacción suelos-estructura para todas las estructuras de edificios, ya que con estos modelos nos acercamos más a la realidad del apoyo de la estructura sobre el suelo.

### Acciones internas en los elementos estructurales

En los muros de carga para el primer modelo, que se suponen empotrados en la base de la estructura, se toma

una gran carga de cortante y momento en comparación con los otros dos modelos de interacción suelo estructura. Esto debido a que los muros de carga giran en su base y liberan gran parte de este momento y cortante, haciendo que se redistribuyan los momentos, cortantes y axiales sobre el resto de columnas en la base de la estructura. Para cuestiones de diseño se deberían tomar en cuenta las acciones internas (momentos, cortantes y axiales) de los modelos de interacción suelo-estructura, en virtud de que éstos se acercan a un comportamiento más real.

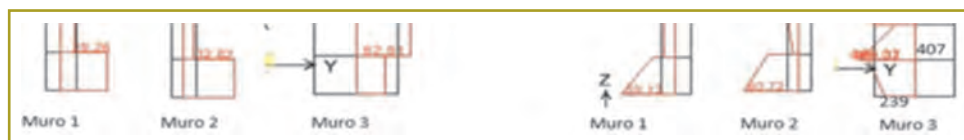
Los diagramas de cortante y momentos flectores en las vigas de cimentación son mayores en la condición de análisis a largo plazo comparados con los diagramas a corto plazo; esto se presenta porque en la condición a largo plazo el suelo presenta una condición más deformada comparada con la condición a corto plazo, lo que obliga a que el ingeniero estructural diseñe las vigas con la condición a largo plazo. Por tanto, se hace necesario que en los estudios de suelos se recomienden asentamientos totales.



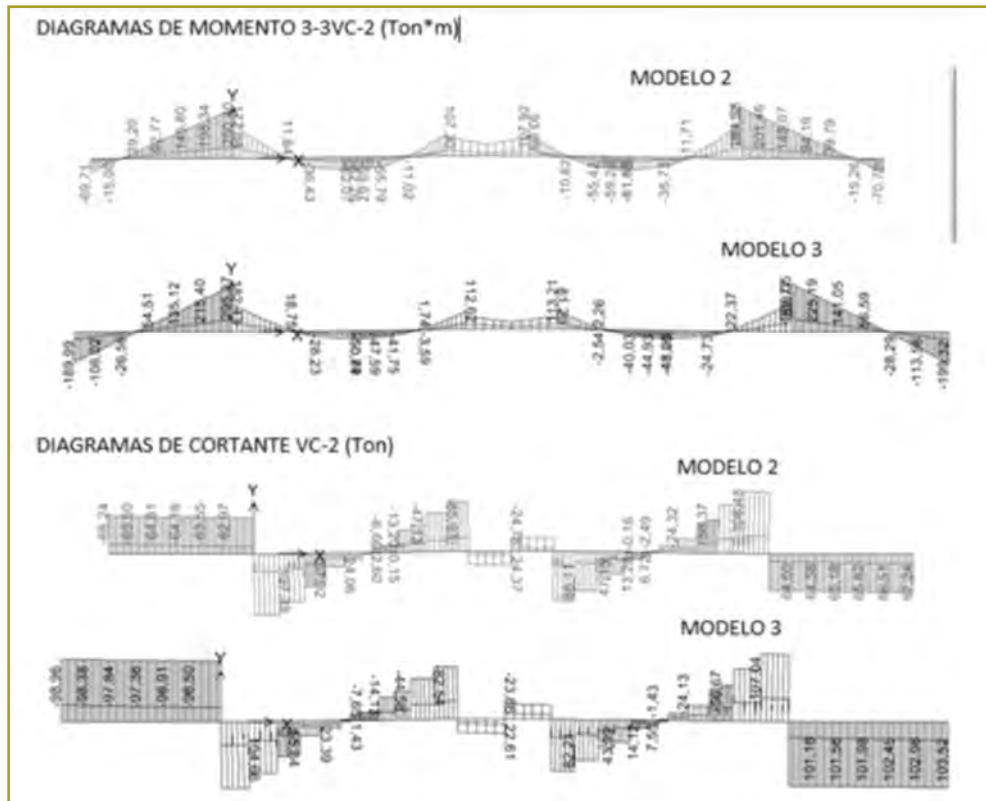
**Figura 8.** Comparación de cortantes y momentos en los muros 1, 2 y 3. Modelo empotrado (ton).



**Figura 9.** Comparación de cortantes y momentos en los muros 1, 2 y 3. Modelo interacción suelo-estructura. Corto plazo (ton).



**Figura 10.** Comparación de cortantes y momentos en los muros 1, 2 y 3. Modelo interacción suelo-estructura. Largo plazo (ton).



## EXCENTRICIDADES DEL SISTEMA DE FUNDACIÓN Y ASENTAMIENTOS

Es importante hacer coincidir siempre el centro de cargas y el centro geométrico de la placa de fundación ante cargas verticales, para garantizar un esfuerzo uniforme de la cimentación sobre el suelo; esto influye en que el asentamiento sea más uniforme y no presente asentamientos diferenciales muy altos. En condición de sismo, hay que aprovechar que los pilotes tomen los esfuerzos de tensión que se pueden presentar ante la acción de volteo en un evento sísmico, lo que hace atractivo el tipo de cimentación de sistema de placa-pilotes.

No se recomienda considerar los asentamientos hallados por la metodología de Winkler debido a que en este método sólo se toman en cuenta dos parámetros, la capacidad portante y el asentamiento, y no se consideran los parámetros compresibles del suelo. Para el caso de los asentamientos, es mejor calcularlos por los métodos tradicionales de la mecánica de suelos, en tanto que los asentamientos diferenciales obtenidos en la modelación por el método de Winkler se acercan mucho más a la realidad, porque los parámetros con los que se modeló

la estructura (materiales, secciones de elementos, cargas y geometría de la edificación) tienen una posibilidad muy baja de ser modificados en su construcción, por lo que los asentamientos diferenciales se hacen muy aproximados a una condición real.

## REFERENCIAS

- Delgado, M. (1999). *Interacción suelo-estructura*. Colección de Notas. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Das, Braja M. (2000). *Principios de ingeniería de cimentaciones*, 4.ª ed. Thomson.
- León & Reséndiz (1979). *Cálculo de asentamientos de cimentaciones sobre pilotes de fricción*. Lima: Memorias del VI Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones.
- Bengt, H., F. Pile Foundations. University of Ottawa.
- Terzaghi, K. & Peck, R.B. (1966). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: Wiley.
- Durán, J.E. (2011). *Apuntes del curso de Ingeniería de Fundaciones*. Maestría en Geotecnia de Fundaciones. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Garzón, J. (2012). *Apuntes del curso de Interacción Suelo-Estructura*. Maestría en Geotecnia de Fundaciones, Escuela Colombiana de Ingeniería.
- NSR 10. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

# Factores que han contribuido al deterioro prematuro de los pavimentos asfálticos en las carreteras nacionales

Factors that have contributed to the premature deterioration of asphalt pavements in national highways

**FERNANDO SÁNCHEZ SABOGAL**

Ingeniero civil.

elexdos@gmail.com

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

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

## Resumen

La falta de un mantenimiento adecuado y oportuno ha incidido consuetudinariamente en el deterioro prematuro de los pavimentos de la red vial nacional; sin embargo, existen otros factores que, en conjunto, han prestado igual o mayor contribución y que, por no haberse atendido debidamente, han hecho que los recursos destinados a la construcción y a la conservación de la red vial nacional no se traduzcan en un mejor estado de ésta.

Las causas del deterioro prematuro de los pavimentos se pueden identificar en las etapas de planeación y diseño, licitación, construcción y mantenimiento, aunque también existen otros factores ajenos a la profesión de la ingeniería y al servicio.

En este artículo se describen algunas de las causas relevantes del problema y se presentan sugerencias para enfrentarlo de manera adecuada.

**Palabras claves:** pavimento, deterioro prematuro, planeación y diseño, licitación, construcción, mantenimiento, sobrecarga, factores ambientales, limitaciones financieras.

## Abstract

The lack of adequate and timely maintenance of the national highway network as well as other additional factors have contributed to premature pavement deterioration, despite of the large amount of resources invested into the construction and maintenance of these roads.

The causes of this premature deterioration can be found in the design, planning, bidding, construction and maintenance stages, although there are other factors beyond the scope of the engineering profession and service.

This document describes some of the causal factors of the problem, and presents a few suggestions to handle them appropriately.

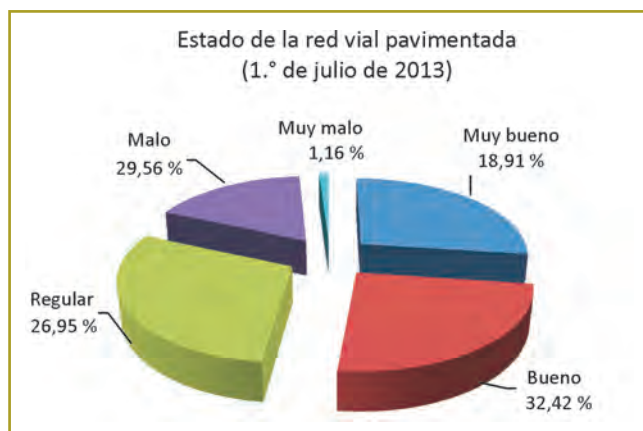
**Keywords:** pavement, premature deterioration, planning and design, bidding, construction, maintenance, overloading, environmental factors, financial constraints.



## INTRODUCCIÓN

El deterioro prematuro de los pavimentos constituye un hecho embarazoso tanto para los funcionarios encargados de la administración de las carreteras, cuya única responsabilidad es poner a disposición de los usuarios una red vial segura, estable y sostenible, como para los ingenieros que participan en la planificación, diseño, construcción y mantenimiento de dichas estructuras. Los deterioros prematuros de los pavimentos se traducen en aumentos de la accidentalidad (con las consecuentes pérdidas de vidas y de propiedades), en incrementos en los costos de transporte, en la necesidad de asignar mayores recursos para las operaciones de rehabilitación o reconstrucción y en la disconformidad de los usuarios<sup>1</sup>.

De acuerdo con los datos del Instituto Nacional de Vías (Invias), la red vial pavimentada a su cargo en 2013, constituida por 8346 km (la gran mayoría en pavimento asfáltico), presentaba un 51,3 % de su longitud en estado entre bueno y muy bueno, lo que implica que el 48,7 % restante oscilaba entre regular y muy malo (figura 1). Estas proporciones no se encuentran alejadas de las reportadas en 2009, según las cuales el 48,5 % presentaba estado bueno o muy bueno, mientras el 51,5 % variaba entre regular y muy malo<sup>2</sup>.



**Figura 1.** Estado de la red pavimentada a cargo del Invias en 2013<sup>3</sup>.

1. A. R. Ajani (2006, May). Causes of premature failures on Nigeria highways.
2. Ministerio de Transporte. Oficina Asesora de Planeación (2010). Transporte en cifras. Versión 2010.
3. <http://www.invias.gov.co/index.php/red-vial-nacional/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>.

Esta situación parece endémica. En un documento de alto nivel elaborado hace 20 años<sup>4</sup>, se reconocía sin ambages lo siguiente: “El principal problema del sector vial colombiano es el avanzado estado de deterioro de la red actual y de la mayoría de los puentes, que ha sido causado por la ausencia de una política adecuada de mantenimiento. De la totalidad de las carreteras pavimentadas del país, únicamente el 37 % se encuentra en buen estado”.

Dos años antes de la presentación de este Plan Nacional de Desarrollo, se había realizado en Popayán el Primer Seminario Regional de Mantenimiento Vial para los países del Grupo Andino y Panamá, auspiciado por el Banco Mundial y otros organismos internacionales, donde se debatió el problema del deterioro prematuro de las carreteras, bajo la hipótesis de que la falta de mantenimiento era su causa fundamental en los países en desarrollo<sup>5</sup>.

No hay duda de que la falta de un mantenimiento adecuado y oportuno ha incidido consuetudinariamente en el deterioro prematuro de los pavimentos de la red vial nacional; sin embargo, existen otros factores que, en conjunto, han prestado la misma o incluso mayor contribución y que, por no haberse atendido debidamente, han hecho que los recursos destinados permanentemente a la construcción y a la conservación de la red vial nacional no se traduzcan en un mejor estado de ésta.

## CAUSAS DEL DETERIORO PREMATURO DE UN PAVIMENTO

Las causas del deterioro prematuro de los pavimentos se pueden identificar en las etapas de planeación y diseño, licitación, construcción y mantenimiento, aunque también existen otros factores ajenos a la profesión de la ingeniería y al servicio público. A continuación se presenta un resumen de los factores relevantes (tabla 1).

4. Presidencia de la República (1994). El Salto Social. Bases para el Plan Nacional de Desarrollo, 1994-1998. DNP.
5. Banco Mundial (1988). El deterioro de los caminos en los países en desarrollo. Causas y soluciones. Washington, D.C.

**Tabla 1**  
Factores que inciden en el deterioro prematuro de los pavimentos

Etapa	Factor
Planeación y diseño	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudios de tránsito poco confiables</li> <li>Carencia o deficiencias en el estudio hidrogeológico</li> <li>Deficiencias en el estudio geotécnico</li> <li>Utilización de un método inapropiado de diseño de pavimentos</li> <li>Elección incorrecta de los parámetros de diseño</li> </ul>
Licitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Selección de contratistas de construcción faltos de idoneidad</li> <li>Uso de especificaciones inapropiadas</li> </ul>
Construcción	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deficiencias en la calidad de la construcción</li> <li>Deficiencias en el autocontrol y en la supervisión</li> </ul>
Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deficiente cultura de mantenimiento</li> <li>Operaciones de mantenimiento inoportunas e inadecuadas</li> </ul>
Otros factores	<ul style="list-style-type: none"> <li>Factores ambientales imprevistos</li> <li>Sobrecargas vehiculares</li> <li>Colapso de otros sistemas de transporte</li> </ul>

### Etapas de planeación y diseño

Las medidas para proteger un pavimento contra el deterioro prematuro deben comenzar en la etapa de planeación, donde todos los problemas (o al menos la gran mayoría) se pueden anticipar y atender en forma de recomendaciones.

**Estudios de tránsito.** Los espesores de las capas de un pavimento dependen de la cantidad, tipos y magnitudes de carga de los vehículos que, se espera, utilicen la carretera. A pesar de que buena parte de la red vial nacional cuenta con estadísticas sobre la evolución anual de los volúmenes de tránsito, éstas corresponden solamente a mediciones hebdomadarias y no están acompañadas de encuestas sobre las cargas por eje y vehiculares.

Por otra parte, los cálculos que hacen los diseñadores de pavimentos sobre los efectos relativos de las cargas sobre los pavimentos se fundamentan en criterios establecidos hace 50 años, los cuales se encuentran, en buena parte, revaluados. Las cargas de referencia por eje tándem y triple que se emplean en Colombia como equivalentes al eje simple patrón de 80 kN se basan en

las establecidas como resultado del AASHO Road Test, en el concepto de falla por “serviciabilidad”. Infinidad de estudios posteriores han determinado que si se consideran otros criterios de falla de los pavimentos asfálticos, las cargas de referencia para dichos ejes son menores. A efectos comparativos, a renglón seguido se muestran las cargas equivalentes al eje simple de rueda doble de 8,2 t, utilizadas actualmente para el diseño de pavimentos asfálticos en Colombia por el Inviás, y en Australia y Nueva Zelanda por Austroads (tabla 2).

**Tabla 2**  
Cargas por eje que se consideran equivalentes al eje simple de rueda doble de 8,2 t

Tipo de eje	Cargas de referencia (t)	
	Inviás <sup>6</sup>	Austroads <sup>7</sup>
Simple de rueda simple	6,6	5,9
Simple de rueda doble	8,2	8,2
Tándem de rueda doble	15,0	13,8
Triple de rueda doble	23,0	18,5

El uso de cargas de referencia mayores trae, como consecuencia indeseable, la infravaloración del efecto de deterioro producido por las cargas por eje tándem y triple, situación particularmente grave para los pavimentos colombianos, si se tiene en cuenta que nuestras cargas legales para dichos ejes se encuentran dentro de las más altas del mundo, con el agravante de que, a pesar de ello, muchos camiones circulan sobrecargados.

Se debe tener en cuenta, también, que los ministros de Transporte han autorizado periódicamente incrementos en las cargas por eje y vehiculares, sin considerar el efecto nocivo que dichas decisiones producen sobre la red vial y, por supuesto, sin que simultáneamente gestionen los cuantiosos recursos necesarios para adaptarla a la nueva realidad que genera tal autorización.

Todo lo anterior conduce, en la mayoría de los casos, a diseñar los pavimentos para intensidades de tránsito inferiores a las que realmente actuarán sobre ellos.

- Instituto Nacional de Vías (1998). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito*. Popayán, Cauca.
- Austroads (2012). *Guide to Pavement Technology*. Part 2: Pavement Structural Design.

El 19 de febrero de 2002, en el ocaso del gobierno del señor Pastrana hijo, se gestó un paro camionero que concluyó cuatro días después tras un acuerdo de los representantes del gremio con el entonces ministro de Transporte, el ilustrísimo señor Gustavo Canal. Uno de los puntos de ese acuerdo motivó la expedición de la Resolución 2501 del 22 de febrero, cuyo artículo tercero autorizó el aumento de los pesos brutos vehiculares de los camiones C2 y C3 a 19 y 30 toneladas, respectivamente, “mientras se adelanta el estudio técnico sobre la real incidencia del incremento del Peso Bruto Vehicular en la red vial nacional”. Dicho acto administrativo tardaría casi tres años en ser revocado mediante la Resolución 4100 de 2004, la cual retornó esos pesos brutos a 16 y 28 toneladas.

El efecto de aquella resolución fue particularmente nefasto para los pavimentos de la red vial nacional. Aun suponiendo que los camiones hubieran transitado con pesos ajustados a los límites legales, el aumento de 16 a 19 toneladas en el C2 se traduciría, en términos elementales, en el hecho de que la circulación de un camión C2 en el límite de carga fijado por la nueva resolución producía en un pavimento asfáltico el doble del deterioro que generaba el mismo camión cumpliendo los límites que estuvieron vigentes hasta el día anterior.

**Estudio hidrogeológico.** El agua puede producir daños considerables en las carreteras. Su presencia tiene dos efectos principales: el primero, que debilita los materiales de construcción, especialmente los no ligados y la subrasante, y el segundo, que produce erosión en los materiales y los transporta a lugares donde su presencia no es deseable, causando daños no sólo en su lugar de origen sino también donde los deposita. Además de lo anterior, su incidencia sobre los deslizamientos del terreno es incuestionable.

En consecuencia, resulta indispensable que, en todos los casos, se realicen estudios hidrogeológicos cuya finalidad es evaluar la problemática hidráulica del entorno y estimar los caudales de diseño de las obras que constituyen los sistemas de drenaje superficial y subterráneo de la carretera. La ejecución de estos estudios está contemplada desde hace muchos años en los términos de referencia del anterior Ministerio de Obras Públicas y del actual Instituto Nacional de Vías. Desafortunadamente, en aras de ilusorios ahorros, es-

tos estudios suelen ser pretermitidos en muchos de los proyectos del Invías, con las inevitables consecuencias que ello acarrea.

En 2007, el Instituto Nacional de Vías abrió varias licitaciones para el mejoramiento y el mantenimiento de los pavimentos de algunas de las carreteras de la red vial nacional. Una de ellas, la SGT-SRN-102-2007, tuvo por objeto la carretera Guateque - Aguacalara, Sector Las Juntas - Santa María, Tramo PR13+800 - PR19+000, Ruta 56-Tramo 5608.

A pesar de que el sector transcurría por terreno montañoso, en el pliego no se contempló la ejecución de estudios hidrogeológicos, pues sólo se exigió y se autorizó la ejecución de los siguientes: a) estudios de geología para ingeniería y geotecnia, b) estudio de suelos para el diseño de fundaciones de obras de arte y estructuras de contención; c) estudio de estabilidad y estabilización de taludes, y d) estudio geotécnico para el diseño de pavimento.

A los pocos meses de colocada la nueva carpeta asfáltica y tras un periodo lluvioso, en su superficie se comenzaron a presentar deterioros típicos motivados por la carencia de un sistema de subdrenaje apropiado, como afloramientos de agua y de finos provenientes de las capas inferiores que, posteriormente, evolucionaron hacia piel de cocodrilo, descascaramientos y baches, situación que generó conflictos entre la entidad y el contratista, los cuales llegaron hasta los estrados judiciales.

**Estudio geotécnico.** Su propósito es identificar, clasificar y caracterizar los suelos naturales de subrasante, así como los materiales de cortes y préstamos que servirán como rellenos o, incluso, como capas del pavimento, y obtener parámetros geotécnicos confiables que sirvan como datos de entrada para el diseño del pavimento.

Cualquier error que se cometa durante los trabajos de exploración de campo y en los ensayos de laboratorio, así como en la interpretación de los resultados de éstos, puede conducir a decisiones que se traducen en la elaboración de diseños inapropiados. En la circunstancia específica en que la interpretación errónea lleve a la sobrevaloración de la capacidad de respuesta de los suelos, el resultado no será otro que la construcción de un pavimento con capacidad estructural inferior a la

necesaria y, consecuentemente, el deterioro prematuro del pavimento.

Por tanto, es necesario que todas las recomendaciones en relación con los parámetros de diseño las formulen únicamente ingenieros de carreteras familiarizados con los problemas comunes en esta área. Los conceptos de mecánica de suelos y de rocas y de geomorfología se deben combinar con un conocimiento de la ingeniería geotécnica y la hidrogeología, para lograr una aplicación cabal de los resultados de la exploración.

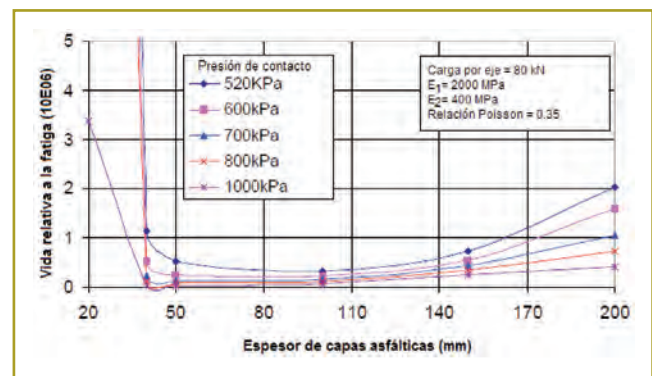
**Métodos de diseño inapropiados o mal empleados.** Durante los últimos 50 años, los métodos más empleados en el país para el diseño de los pavimentos asfálticos de carreteras han sido el del Instituto del Asfalto en sus ediciones séptima y octava, el MOP-70 con su ajuste MOP-75, el AASHTO-86 (la guía publicada por la AASHTO en 1993 no presentó ninguna variación en relación con el diseño de los pavimentos asfálticos) y el Shell-78, junto con su versión SPDM 3.0 de 1998.

Los métodos del Instituto del Asfalto, por la misión misma de la institución y por haberse preparado para un país con muchas regiones donde el congelamiento y el deshielo son aspectos que hay que considerar en el diseño, siempre han tenido la tendencia a recomendar espesores excesivos de las capas asfálticas. Teniendo en cuenta que a mediados del siglo XX los métodos basados en el ensayo CBR hacían énfasis en la limitación de los esfuerzos compresivos sobre la subrasante para prevenir el ahuellamiento, los diseñadores colombianos consideraron conveniente, por razones económicas, reducir los espesores de capas asfálticas recomendados por el Instituto del Asfalto y compensarlos con espesores “equivalentes” de capas granulares, aplicando unos factores de conversión empíricos. De esta manera, las capas asfálticas de rodadura de 5 y 7,5 cm prácticamente se institucionalizaron en los pavimentos del país<sup>8</sup>.

El procedimiento, si bien no resultaba contraproducente desde el punto de vista de la protección de la

subrasante, lo era desde la óptica del comportamiento de las capas asfálticas, las cuales quedaban sometidas a esfuerzos considerables de tracción por flexión que se traducían en agrietamientos prematuros, como se pudo comprobar teóricamente cuando se comenzaron a emplear en el país los procedimientos basados en la teoría de la elasticidad aplicada a sistemas de capas múltiples.

A continuación se muestra que los espesores intermedios de capas asfálticas ( $50 < h < 100$  mm) dan lugar a los mayores niveles de deformación horizontal por tensión para casi todas las relaciones modulares y presiones de contacto sobre la superficie y son muy sensibles a la fatiga.



**Figura 2.** Ejemplo de vida relativa a fatiga de un pavimento asfáltico en función del espesor de las capas asfálticas<sup>9</sup>.

El método MOP-70<sup>10</sup>, básicamente una traducción y adaptación del informe LR 279 del Road Research Laboratory de la Gran Bretaña, permitió superar uno de los inconvenientes de aplicación del método del Instituto del Asfalto, pues se preparó para empleo específico en zonas tropicales; sin embargo, también presentaba el inconveniente de recomendar espesores de capas asfálticas de 5 cm. Como este método sólo era aplicable hasta 2,5 millones de ejes equivalentes, un asesor del ministerio preparó unas curvas que permitían su empleo

8. Pablo Lederman S. & Manuel García López (1976, mayo). *Evaluación de los métodos empleados por el Ministerio de Obras Públicas para el diseño de pavimentos flexibles*. Memorias del Primer Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos. Medellín.

9. Lubinda F. Walubita & Martin F. C. van de Ven (2000). *Stresses and Strains in Asphalt-Surfacing Pavements*. University of Stellenbosch, Civil Engineering Department, Matieland 7602, South Africa.

10. Ministerio de Obras Públicas (1970, enero). *Guía para el diseño estructural de pavimentos flexibles en Colombia*. Bogotá.

para tránsitos hasta de cinco millones de ejes en el carril de diseño, conservando el espesor de carpeta asfáltica en 5 cm. A esas nuevas curvas se les dio el nombre de método MOP-75. El autor del presente documento, en ese momento funcionario del ministerio, demostró, a partir de documentos técnicos conocidos con motivo de la Tercera Conferencia Internacional sobre el Diseño Estructural de Pavimentos Asfálticos<sup>11</sup>, que se necesitaba más del doble de dicho espesor para proteger las capas asfálticas contra el agrietamiento prematuro; sin embargo, sus superiores, considerando que dicha recomendación tendría implicaciones de importancia sobre los costos iniciales de las obras, sólo autorizaron incrementarlo a 7,5 cm. Como se puede apreciar en la figura 2, el incremento de sólo 2,5 cm resultaba insuficiente para proteger contra el agrietamiento prematuro los pavimentos asfálticos diseñados con este método.

El método AASHTO-86, que permite el diseño de pavimentos con bases granulares o estabilizadas con cemento o asfalto, fue bien acogido por la ingeniería nacional y ha sido de vasta aplicación en el diseño de pavimentos para las calles y carreteras nacionales. El método, que se resume en un algoritmo de muy sencilla aplicación, contiene una gran cantidad de limitaciones que, con el transcurso del tiempo, han tenido que reconocer sus autores, hasta el punto de que en 2008 la AASHTO lo sustituyó por otro de filosofía absolutamente distinta. Obviamente, esas limitaciones han incidido sobre los pavimentos construidos en el país con base en este método. Algunos de los inconvenientes incluidos en la lista de la AASHTO son los siguientes<sup>12</sup>:

1. El algoritmo de diseño se basa en análisis de regresión de los datos obtenidos en el AASHO Road Test, pista que sólo soportó un poco más de un millón de aplicaciones de carga, lo que hace que su empleo en diseños para vías con flujos vehiculares que exceden con largueza dicho valor significa extrapolar, sin ninguna certeza, la metodología de diseño mucho
2. El AASHO Road Test se condujo en una región geográfica específica, por lo que resulta imposible abordar los efectos de otras condiciones climáticas sobre el comportamiento de los pavimentos. La posterior asignación de los coeficientes de drenaje no fue otra cosa que un trabajo de gabinete basado en suposiciones.
3. Las suspensiones de los camiones, las configuraciones de sus ejes y los tipos de neumáticos y sus presiones de inflado representaban bien las condiciones de finales de los años cincuenta, pero no interpretan las condiciones actuales.
4. Las características de los materiales y las técnicas empleadas en la construcción de las pistas eran las más apropiadas para la época, pero no representan el avance tecnológico en ambos aspectos.
5. Las secciones del ensayo no incluyeron sistemas de subdrenaje, los cuales son comunes en las carreteras actuales.
6. Dado que la prueba AASHO tuvo una duración muy corta, no fue posible valorar debidamente los efectos cíclicos del clima ni el envejecimiento de los materiales de construcción. El ensayo duró solamente dos años, mientras en la actualidad los pavimentos se diseñan para 20 años y más.
7. Los diseños por el método AASHTO se basan en el concepto de serviciabilidad, el cual está ligado, fundamentalmente, a las deformaciones longitudinales del pavimento. Las investigaciones y observaciones posteriores han demostrado que otros defectos, principalmente los agrietamientos, son determinantes en la falla y en los costos de mantenimiento y reparación de los pavimentos asfálticos.
8. El procedimiento incluido en el método AASHTO-86 para considerar la confiabilidad del diseño jamás se sometió a validación.

Independientemente de las limitaciones del método, el uso poco cuidadoso que han hecho de él muchos diseñadores locales ha conducido a infinidad de subdiseños de pavimentos asfálticos en la red vial nacional. Con una contumacia casi digna de admiración, nuestros ingenieros han empleado en sus cálculos, una vez tras otra, valores del índice de servicio inicial entre 4,0 y 4,5, equivalentes a rugosidades inferiores a 1,5 m/km en términos del IRI.

11. Third International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements (1972). *Proceedings*, vol. I. London.

12. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2008, July). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*. Interim Edition. Washington, D.C.

El hecho de que durante la cuidadosa construcción de las pistas flexibles de la AASHO se haya alcanzado un índice de servicio de 4,2 no implica que los constructores colombianos de pavimentos dispongan de la capacidad técnica suficiente para obtenerlo de manera sistemática. En la realidad nacional, el índice de servicio inicial de los pavimentos que se están construyendo difícilmente supera 3,5 en los términos en los que la AASHO definió este parámetro.

Suponer un índice inicial de 4,0 o 4,5 cuando el que verdaderamente se materializa es 3,5, no ha implicado otra cosa que recomendar espesores inferiores a los realmente requeridos, cuya consecuencia práctica ha sido, inevitablemente, el diseño de pavimentos con periodos de subsistencia mucho menores del que el MOPT y el Invías supusieron al contratar los estudios y la construcción.

El índice de servicio presente (ISP) es una medida del servicio que le presta el pavimento al usuario en un momento determinado. Se obtiene a partir de medidas de rugosidad y de algunos deterioros (agrietamiento, ahuecamiento y áreas parchadas). La rugosidad es el factor dominante en la determinación del ISP, hasta el punto de que con el transcurso de los años se establecieron correlaciones directas entre estos dos parámetros. Una de las más reconocidas se debe a Paterson<sup>13</sup>:

$$\text{ISP} = 5 * e^{(-0,18 * \text{IRI})}$$

Donde:

$e$  = base de los logaritmos naturales.

IRI = índice internacional de rugosidad (m/km).

Otra, es la referida por Gillespie<sup>14</sup>:

$$\text{ISP} = 5 - 0,633 * \text{IRI}$$

(recomendada para valores de IRI hasta 4,7 m/km)

13. W.D.O. Paterson (1986). International roughness index: relationship to other measures of roughness and riding quality. *Transportation Research Record*, 1084, TRB, Washington, D.C.

14. T.D. Gillespie (1992). Everything you always wanted to know about the IRI, but you were afraid to ask! Lincoln, Nebraska: Road Profile Users Group Meeting.

Los valores de IRI a los cuales dan lugar diferentes valores del ISP, empleando estas dos correlaciones, se muestran en la tabla siguiente:

**Relación entre los valores de ISP e IRI**

ISP	IRI (m/km)	
	Paterson	Gillespie
4,5	0,58	0,79
4,0	1,24	1,56
3,5	1,95	2,37
3,0	2,83	3,16
2,5	3,85	3,95
2,0	5,09	4,74
1,5	6,69	N/A

En 1998, el Instituto Nacional de Vías publicó un manual para el diseño de pavimentos asfálticos para vías de medios y altos volúmenes de tránsito<sup>15</sup>, adoptado por la entidad como norma de diseño mediante la Resolución 002857 del 6 de julio de 1999. A pesar de ser el único documento de diseño que tiene aval oficial y de que incluye algunas adaptaciones al medio colombiano en lo relacionado con el espectro de cargas y las condiciones climáticas, su uso ha sido muy limitado, por no decir que nulo. De todas maneras, como el catálogo de diseño incluido en el manual se deriva del método AASHTO-86, le caben todas las observaciones hechas al empleo de éste. Baste decir, por ejemplo, que las estructuras recomendadas suponen un índice de servicio inicial de 4,2 (equivalente a un IRI inferior a 1,5 m/km), inconsecuente con las posibilidades de los constructores locales y con los límites de regularidad superficial admitidos por las especificaciones de construcción de carreteras del Invías.

El método de diseño Shell-78 y su aplicación SPDEM 3.0 han permitido la ejecución de diseños mucho más consistentes, debido a su concepto empírico-mecánico, así como al hecho de considerar apropiadamente los efectos de las altas temperaturas de servicio sobre el módulo de los materiales asfálticos; no obstante, como para su aplicación el parámetro tránsito se evalúa prácticamente en igual forma que en el método AASHTO, se generan las mismas incertidumbres en relación con la calidad y la confiabilidad de los diseños.

El hecho de que todos los métodos de diseño de pavimentos reconocidos y corrientemente aceptados

15. *Ibid.*, nota 6.

den lugar a espesores diferentes para unos parámetros de diseño similares, no implica que haya uno exacto mientras los otros yerran por completo. Si ello fuese así, los científicos de la ingeniería de pavimentos ya habrían establecido cuál es el correcto y habrían relegado los demás al ostracismo. La circunstancia de que se presenten diferencias en los resultados de los métodos que hoy se aceptan como “buenos” obedece a muchos factores: la manera como cada uno considera el efecto de las condiciones ambientales sobre el comportamiento de los suelos, las incertidumbres sobre el tránsito y el comportamiento estocástico de los materiales; las simplificaciones que incluya; las confiabilidades que contemple, etc. Por lo tanto, la mayor o menor aceptación que pueda llegar a tener un determinado método radica en su capacidad de proveer pavimentos que se comporten en forma más o menos parecida a la esperada en el medio donde se construyen. Esto exige un proceso de verificación que incluye comparaciones cualitativas y cuantitativas periódicas entre el comportamiento esperado y el medido u observado. Estas comparaciones no se han hecho durante los últimos 20 años en la red vial nacional, por cuanto la investigación ha constituido un asunto marginal para el Instituto Nacional de Vías, hasta el punto de que el laboratorio de ensayo de ingeniería de materiales que heredó del MOPT, el mejor del país durante muchos años, ha desaparecido.

### **Etapas de licitación**

La licitación pública es un procedimiento de formación del contrato, que tiene por objeto seleccionar al sujeto que ofrece las condiciones más ventajosas para los fines de interés público que se persiguen con la contratación estatal.

**Selección inadecuada de contratistas.** El recorrido hacia la materialización de un proyecto exitoso de ingeniería civil comienza con la adecuada elección del contratista de construcción. Los procedimientos generales para la elección de los contratistas de las obras públicas han estado regulados siempre por leyes y decretos. Por regla general, la elección del contratista se efectúa mediante licitación pública; en algunos casos expresamente establecidos por la ley, el contratista se escoge mediante otra modalidad de selección. Los pliegos de condiciones indican los criterios para seleccionar la oferta más favorable para los intereses de la entidad.

Aunque durante el desarrollo del proceso se cumplan cabalmente las normas conducentes a conseguir que el contrato se realice de manera que la administración pública tenga las mayores posibilidades de acierto en la elección del beneficiario, siempre está latente la posibilidad de incurrir en equivocaciones que lleven a adjudicar los trabajos a un contratista poco competente, particularmente cuando la selección se hace dando la mayor calificación a la oferta de menor valor.

**Uso de especificaciones de construcción inapropiadas.** Durante los últimos 50 años, la construcción de las carreteras nacionales se ha realizado de acuerdo con las especificaciones generales y particulares de construcción preparadas inicialmente por el Ministerio de Obras Públicas y en la actualidad por el Instituto Nacional de Vías.

La actualización periódica de las especificaciones ha obedecido a la necesidad de adaptarlas al desarrollo permanente en la tecnología de los materiales de construcción y en los equipos de construcción y control, a las exigencias que se derivan de la presencia cada vez mayor de vehículos de carga más grandes y pesados, y a las demandas políticas, económicas y sociales que imponen las tendencias hacia el desarrollo sostenible.

Cuando las especificaciones se han rezagado respecto de las nuevas exigencias, los efectos sobre la red vial nacional han sido lamentables. Los pavimentos construidos en las principales vías del país con motivo de los planes viales de la década de los cincuenta –así como otros construidos durante los años sesenta– alcanzaron a mediados de los setenta unos índices de servicio críticos, lo que hizo necesaria la ejecución urgente de estudios para su rehabilitación. Éstos los efectuaron consultores nacionales con la asesoría de la firma francesa Ingeroute, cuyos expertos prepararon las “Normas y Especificaciones Generales de Construcción para el Plan de Recuperación de la Red Nacional Pavimentada”, de las cuales hubo dos versiones: una preliminar, de abril de 1977, y la definitiva, publicada en marzo de 1979. Esta última formó parte de los contratos de obra suscritos en los meses siguientes para la rehabilitación de las carreteras incluidas en el Plan.

Teniendo en cuenta la magnitud y la frecuencia de las cargas circulantes por las carreteras incluidas en el Plan de Recuperación, estas especificaciones incluían nuevos aspectos de gran exigencia técnica. Sin embargo,

carentes de la logística de las empresas internacionales de construcción vial, cuyas plantas de producción de agregados disponían generalmente hasta de trituradoras cuaternarias, los contratistas nacionales tuvieron dificultades para producir los agregados y las mezclas con los índices de calidad demandados, lo que generó numerosas glosas de las interventorías y retrasos en la ejecución de muchas de las obras. La solución adoptada por el ministerio no pudo resultar más funesta para la debilitada red vial nacional: mediante la Resolución 7123 del 3 de agosto de 1982, la entidad adoptó como especificaciones generales para las siguientes licitaciones en todo tipo de carreteras unas que se habían elaborado en 1970 para un Plan de Pavimentación de vías de bajo tránsito. En la práctica, esto significó que, desde entonces, el ministerio aplicó unas especificaciones de construcción elaboradas para vías con niveles de tránsito inferiores a 250 vehículos por día, en carreteras que soportaban un volumen cuando menos cuatro veces mayor y donde el efecto agresivo de las cargas de los camiones sobre los pavimentos se había cuando menos duplicado en relación con el detectado en 1970.

Esta decisión administrativa trajo, por supuesto, consecuencias muy adversas sobre la durabilidad de los pavimentos y de sus obras de rehabilitación durante los siguientes quince años, hasta que, a finales de 1996, el Instituto Nacional de Vías materializó sus primeras especificaciones de construcción y derogó de manera definitiva las del Plan de Pavimentación.

En la *Guía para el diseño estructural de pavimentos flexibles en Colombia*<sup>16</sup>, publicada en enero de 1970, menciona que “Los estudios realizados hasta ahora por el Ministerio de Obras Públicas en cinco estaciones (...) han demostrado que, en la mayoría de las carreteras colombianas, cien (100) vehículos comerciales (camiones y buses únicamente) equivalen aproximadamente a ciento cincuenta (150) ejes de 8,2 toneladas (factor camión igual a 1,5)”.

Los resultados de una encuesta contratada por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte en 1981 con la firma Tecnoconsulta Ltda., para estudiar los pesos y dimensiones de los vehículos circulantes por las carreteras nacionales, indicaron que el factor daño promedio de los camiones C2 era 3,30, el de los C3

era 4,44 y el de los C3S2 era 5,25<sup>17</sup>, lo que comprueba el incremento sustancial de la agresividad del parque automotor sobre los pavimentos de la red vial durante la década de los setenta.

### Etapa de construcción

Un pavimento es tan bueno como lo son los materiales y la calidad del proceso constructivo. Atendiendo su posición dentro de la estructura, los materiales y mezclas deben satisfacer algunos requisitos sobre composición, resistencia mecánica y durabilidad que aseguren el cumplimiento satisfactorio de sus funciones durante el periodo de diseño previsto. Dichos requisitos se encuentran descritos en las especificaciones de construcción. Como se indicó en los párrafos precedentes, materiales que pueden resultar apropiados para soportar un tránsito liviano no lo son cuando las condiciones de carga, frecuencia y presión de contacto son mucho más intensas.

### Deficiencias en la calidad de la construcción.

Los ensayos de control y los límites que establecen las especificaciones a sus resultados definen la calidad de los productos que desea obtener la entidad contratante y reflejan las condiciones que, de acuerdo con su experiencia, son necesarias para garantizar las condiciones de estabilidad, seguridad y durabilidad de la obra construida, por las cuales conviene un precio con el contratista. El uso de materiales y la entrega de productos de inferior calidad no sólo constituyen un incumplimiento de las condiciones económicas pactadas sino que, dependiendo de la magnitud y de la frecuencia de los incumplimientos, se puede traducir en un excesivo mantenimiento durante la vida del pavimento y, generalmente, en costosas rehabilitaciones.

Los ejemplos del empleo de materiales inadecuados en la construcción de las carreteras nacionales son abundantes. Para citar sólo uno, las areniscas de la zona oriental de Bogotá, cuyos bajos valores de limpieza y

16. *Ibíd.*, nota 10.

17. Fernando Sánchez Sabogal (1983). Las cargas que circulan por las carreteras colombianas y su efecto en el diseño y el comportamiento de los pavimentos flexibles. *Segundo Congreso Latinoamericano del Asfalto*, tomo 1. Mar del Plata, 21 a 25 de noviembre.



resistencia a la abrasión sólo hacían idóneo su uso en la construcción de pavimentos mediante el mecanismo de la estabilización química, se emplearon durante mucho tiempo en la elaboración de bases granulares y concretos asfálticos de vida reducida, tanto en la capital como en algunas carreteras vecinas.

Los asfaltos han sido también un obstáculo contra la durabilidad de los pavimentos, situación que ha sido especialmente delicada y difícil de controlar a causa del monopolio que ha tenido Ecopetrol sobre su producción. El incumplimiento de los requisitos indicados en las especificaciones ha sido persistente, a pesar de las continuas manifestaciones del productor en contrario. Los cementos asfálticos que se producían en Apiay condujeron a infinidad de fracasos, debido a su exagerada viscosidad; además, el procedimiento utilizado por Ecopetrol para reducirla no sólo no garantizaba el buen comportamiento del producto sino que, además, generaba una considerable contaminación ambiental al calentarlo para la fabricación de las mezclas.

Aunque no se refieren ni a un pavimento asfáltico ni a una carretera nacional, los estragos producidos en algunos pavimentos de la capital colombiana debido al empleo de un producto conocido como “relleno fluido” constituye el ejemplo perfecto de las nefastas consecuencias del uso de un material inapropiado sobre la vida de un pavimento.

El uso de equipos y técnicas constructivas inapropiadas y la falta de personal calificado para la ejecución de las operaciones de construcción conspiran también contra la durabilidad de los pavimentos. A pesar de que, por ejemplo, hace casi dos décadas las especificaciones del Invías prohíben terminantemente el uso de dispositivos por gravedad para la ejecución de los riegos de liga, los contratistas de obra los siguen utilizando sin limitación, ante la pasividad de las interventorías.

Los tratamientos superficiales, que en países como Australia y Nueva Zelanda brindan a bajo costo vidas superiores a diez años aun en carreteras sometidas a tránsito intenso, han constituido un dolor de cabeza para la ingeniería colombiana, hasta el punto de que un distinguido ministro de Transporte decidió proscribirlos durante su gestión. Su éxito depende del cabal cumplimiento de las especificaciones en cuanto a los

materiales y equipos, y de poner en su ejecución el mismo nivel de rigor que se suele aplicar en la construcción de los concretos asfálticos. El empleo de equipos en estado deficiente y la dificultad de obtener un control adecuado de su proceso de construcción ha tenido como efecto inmediato que su vida sea mucho más corta de lo que pudiera ser, lo que posiblemente llevó a la citada decisión ministerial.

**Deficiencias en el autocontrol y en la supervisión.** En 1996, el autor de este informe elaboró un documento, titulado “Aporte sobre la calidad de los trabajos de construcción de la Red Vial Nacional”, disponible en la biblioteca del Instituto Nacional de Vías, en el que definió el término “elasticidad del interventor”, como la posibilidad de que éste aceptara materiales y trabajos terminados por fuera de los límites de las especificaciones que, en ese instante, eran las del Plan de Pavimentación del MOP. Evaluando la información correspondiente a cinco contratos en ejecución, se encontró que, en proporciones variables, todos los interventores presentaban gran elasticidad.

Ante estos resultados, y con el fin de reducir las incertidumbres a que daban lugar las especificaciones del ministerio en relación con la frecuencia de los controles y la manera de interpretar sus resultados, las especificaciones publicadas por el Instituto Nacional de Vías se han redactado de una manera taxativa en ese sentido. El tamaño de los lotes de verificación, el número de ensayos que hay que realizar por lote y la forma de procesar sus resultados y de definir la aceptabilidad o rechazo del producto se describen con detalle en los artículos del documento. A pesar de ello, no se conoce a la fecha un solo contrato en que alguna supervisión haya atendido dichos requerimientos en su totalidad. Incluso, hay pruebas de verificación en las que ni siquiera se realizan, por ejemplo, las comprobaciones de la resistencia al ahuellamiento en el laboratorio y la toma de fotografías infrarrojas para constatar las condiciones de colocación y compactación de las mezclas asfálticas en caliente. En otros casos, tales como los suministros de cemento asfáltico y emulsiones asfálticas, cuya calidad se puede verificar en obra mediante ensayos de muy sencilla ejecución, el control de la supervisión no suele llegar más allá de la revisión del certificado que le entregan el fabricante o el proveedor del producto.

Otros aspectos determinantes en relación con la calidad del autocontrol y de la supervisión son la competencia del personal asignado a dichas actividades y el estado de los laboratorios y de los equipos empleados para los ensayos de control. El MOPT anteriormente y hoy el Invías han sido muy escrupulosos en relación con los requisitos de formación y experiencia de los profesionales asignados a los estudios y las interventorías, pero nunca se han preocupado por la competencia de las personas que suministran la mayor parte de la información con base en la cual se toman las decisiones: los laboratoristas. Aunque en la actualidad algunos de ellos ostentan el título de geotecnólogos, buena parte de los que aún prestan servicios en los contratos de estudios y de construcción de carreteras carecen de formación académica y han adquirido su saber merced a la transmisión de conocimientos ancestrales, sin preocuparse por la actualización ni disponer de la capacidad de análisis suficiente para considerar las implicaciones que pueda tener la ejecución de los ensayos, sin el apego absoluto a lo que describen las normas.

Superar esta falencia debe ser una acción inmediata. Por tal motivo, en las más recientes normas de ensayo de materiales del Invías se ha establecido la obligación de que los técnicos de laboratorio que trabajen en los contratos suscritos por la entidad demuestren su idoneidad mediante un certificado expedido por una organización de normalización reconocida o un establecimiento universitario aprobado, en el que se certifique que son competentes para llevar a cabo los procedimientos propios de los ensayos descritos en éstas.

Para que la ejecución de los ensayos sea correcta no basta con que los técnicos de laboratorio sean idóneos. También debe serlo el entorno en el cual los realizan. Ha sido frecuente, a lo largo de los años, que el recinto destinado al laboratorio en los campamentos de contratistas e interventores sea el más recóndito, oscuro y falto de ventilación y de higiene. Igualmente, que los equipos y otros elementos de ensayo no se ajusten a las medidas y demás requisitos de las normas de ensayo, a causa de su excesivo desgaste, mal manejo, falta de mantenimiento y carencia de calibración en los casos en que corresponde. Hasta ahora, ha sido más la excepción que la regla encontrar laboratorios de obra que resulten confiables por mantener registros de todos los equipos calibrados o verificados.

## Etapa de mantenimiento

Una vez que la vía entra en operación, comienza el deterioro natural por el uso. La falta de mantenimiento siempre se ha considerado causa fundamental del deterioro prematuro de las carreteras. Se han publicado infinidad de documentos que coinciden en dicha afirmación y todos incluyen la misma curva, donde se muestra la manera teórica como disminuye el índice de servicio con el uso y las consecuencias técnicas y económicas de no atender en forma oportuna las labores de mantenimiento (figura 3)<sup>18 19 20</sup>. La preocupación del Banco Mundial (BM) por el tema lo llevó a organizar en Latinoamérica una cadena de seminarios sobre programas de mantenimiento vial (Provincial), de los cuales el primero, que se celebró en Colombia, tuvo lugar en 1993<sup>21</sup>.

Cuando el Instituto Nacional de Vías entró en funciones, decidió atender las recomendaciones del BM y puso en marcha, en febrero de 1995, el Plan para la Conservación del Patrimonio Vial de Colombia (Provincial Colombia), diseñado para considerarlo una política de gobierno en la que la red vial nacional se reconocía como una infraestructura de servicio social. El programa, que recibió un importante impulso durante algunos años, fue relegado a segundo plano durante las administraciones posteriores.

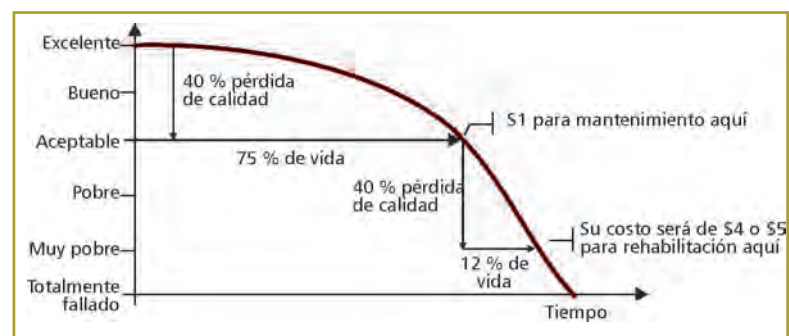


Figura 3. Condición típica del ciclo de vida de un pavimento.

18. *Ibíd.*, nota 5.

19. Cepal (1994). *Caminos: un nuevo enfoque para la gestión y conservación de redes viales*. Santiago de Chile.

20. CAF (2010). *Mantenimiento vial*. Informe sectorial.

21. Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1993). *Memorias del Primer Seminario Regional del Programa de Mantenimiento Vial (Provincial) para los países del Grupo Andino*. Popayán: Universidad del Cauca, 9-13 de agosto.

**Deficiente cultura de mantenimiento.** Los factores que más han entorpecido el fortalecimiento de las actividades de mantenimiento vial en Colombia son la escasa presión del público para mejorar y mantener las carreteras y la falta de un financiamiento eficiente y seguro.

Según el Banco Mundial<sup>22</sup>, los organismos viales encargados de las redes no concesionadas no sufren directamente las consecuencias de la falta de mantenimiento, debido a que no administran los servicios de transporte terrestre. Por lo tanto, no pagan el total del precio de un mantenimiento escaso o nulo, ni están sometidos a las presiones del mercado ni a la presión del trato directo con el público, como sucede, por ejemplo, con los servicios de salud, educación y transporte. Los camioneros rara vez tienen el conocimiento suficiente para valorar los altos costos de operación de sus vehículos en los caminos malos y los propietarios de los automóviles están demasiado dispersos para formar grupos de presión que exijan caminos mejores. Además, es poco probable que los efectos de un mantenimiento deficiente se hagan sentir antes de que el problema haya alcanzado suma gravedad. Las obras de mantenimiento no permiten cortar cintas de inauguración ni obtener votos; por consiguiente, sin grupos de presión que los fustiguen, los políticos y los administradores se preocupan poco por los caminos y el organismo se va transformando en una institución que se usa para fines de patronazgo político y alivio del desempleo.

En relación con la insuficiencia de fondos, el Banco Mundial<sup>23</sup> señala que al no contar con apoyo político ni haber presión del mercado, los presupuestos para el mantenimiento de las carreteras no suelen guardar ninguna relación con las necesidades para su atención. Pero, aun en el evento de que se asignen fondos suficientes, los intereses políticos o privados ejercen presión sobre los organismos viales (o sobre sus fuentes de financiación) para desviar los fondos hacia otros propósitos: la famosa “mermelada”, como eufemísticamente se denominó la asignación a dedo de ingentes recursos estatales con fines reeleccionistas durante el gobierno del presidente Juan Manuel Santos. Dicha interferencia, que en el caso colombiano es uno de los problemas

administrativos más graves, sólo se puede controlar, desafortunadamente, en la arena política.

**Operaciones de mantenimiento inoportunas e inadecuadas.** El comportamiento de un pavimento depende de cuándo y cómo se hace su mantenimiento. El cuándo es muy importante. En la tan conocida figura 3 se ilustra la relación entre la caída del índice de servicio y los costos asociados a los trabajos de mantenimiento, según el instante en que éstos se acometan. Se muestra que si no se invierte un peso en mantenimiento cuando se ha consumido el 75 % de la vida del pavimento y su nivel de servicio ha decaído sólo en 40 %, se requerirá una inversión al menos cuatro veces mayor en rehabilitación luego de que se pierda otro 40 % del nivel de servicio, y que llegar a ese estado tomará apenas 12 % más de la vida del pavimento. Aunque estos porcentajes pueden variar dependiendo de muchas circunstancias, el concepto general es válido y pone de relieve la importancia de la oportunidad en la ejecución de las obras de mantenimiento y rehabilitación de un pavimento. Por lo tanto, los refuerzos deben planearse mediante sistemas eficientes de administración, con el fin de construirlos en el instante óptimo. En la medida en que no lo sean, los trabajos por realizar serán mayores y, por ende, más costosos.

Las principales consecuencias que se derivan del retraso en la construcción de un refuerzo de mantenimiento periódico son las siguientes<sup>24</sup>:

- Incremento del costo del tratamiento previo.
- Aumento en el espesor y en el costo del refuerzo.
- Aumento en los costos de operación vehicular.
- Incremento de los reclamos de la comunidad.
- Disminución de la vida del refuerzo, por cuanto nunca es posible eliminar todos los daños de la estructura existente.
- Costos más altos durante el ciclo de vida para conservar el pavimento en servicio durante un periodo prolongado.

En la figura 4 se presenta, utilizando la misma curva de la figura 3, una relación conceptual entre la condición

22. *Ibíd.*, nota 5.

23. *Ibíd.*

24. Instituto Nacional de Vías (2007). *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*. Bogotá.

del pavimento y las necesidades de mantenimiento y rehabilitación. Se puede apreciar que el instante recomendable para el refuerzo (mantenimiento periódico) ocurre cuando la pendiente de la curva de condición del pavimento aún no es muy pronunciada.



**Figura 4.** Espectro de alternativas de rehabilitación de pavimentos asfálticos.

### Otros factores que inciden en el deterioro prematuro de los pavimentos

**Factores ambientales imprevistos.** Hay ocasiones en que las fuerzas de la naturaleza invalidan los datos estadísticos que forman parte de la información requerida para el diseño del pavimento. Es el caso de las precipitaciones. La ocurrencia de lluvias extraordinarias durante la construcción del pavimento, incluso durante su operación, puede producir el colapso súbito y prematuro de un pavimento. Lo mismo sucede con los movimientos telúricos.

**Sobrecargas vehiculares.** El daño causado a un pavimento por las cargas que exceden los límites legales aumenta de manera desproporcionada en relación con el incremento en la magnitud de las cargas; por ejemplo, un eje con el doble de la carga legal puede causar un daño superior en más de quince veces el producido por uno en el límite de ésta, dependiendo del tipo y de la condición de la estructura y del criterio de falla que se considere.

La circulación de camiones sobrecargados constituye, en principio, un serio problema para la economía nacional. Sus efectos inmediatos son un deterioro acelerado del pavimento y un incremento dramático en

los costos de mantenimiento y rehabilitación. Pero las sobrecargas no sólo causan pérdidas económicas para el país, sino que además producen problemas ambientales y de seguridad.

Considerando que los fondos disponibles para la construcción de nuevas carreteras y el mantenimiento de las existentes suele ser limitado, es esencial que las autoridades nacionales hagan respetar la reglamentación existente sobre los pesos por eje y vehiculares, con el fin de proteger uno de los patrimonios más valiosos del país. Además, la escasa aplicación de las normas a este respecto trae como consecuencia que, de manera deliberada, algunos transportadores sobrecarguen abusivamente sus vehículos, buscando aumentar en forma sustancial sus beneficios y haciéndoles una competencia desleal a los operadores respetuosos de la ley.

Se debe considerar, así mismo, que los vehículos sobrecargados constituyen un peligro para el tránsito público al requerir mayores distancias para el frenado y ser más propensos al vuelco en carreteras con fuertes pendientes y curvas cerradas, típicas en las zonas cordilleranas del país. Por otra parte, como en Colombia prácticamente no existen carriles adicionales para tránsito lento en los tramos en ascenso de las carreteras de una sola calzada, la escasa velocidad del vehículo sobrecargado, a la vez que produce una mayor contaminación del aire, genera atascos de tránsito y considerables aumentos en los costos de operación de los demás usuarios. Esta situación se vive cotidianamente, por citar sólo un caso, en el tramo vial entre Ibagué y Armenia.

La circulación de camiones sobrecargados por la red vial colombiana no admite la menor discusión. El simple hecho de que en los operativos de pesaje realizados por el Invías en 2011 se hayan determinado factores promedio de daño vehicular de 8,58 y 29,47 para los camiones C3 en las carreteras de Valle y Cesar, respectivamente, lo demuestra de manera palpable<sup>25</sup>.

**Colapso de otros sistemas de transporte.** Excluyendo el transporte férreo de carbón y de combustibles por tubería, el transporte carretero constituye el sistema

25. Luis F. Macea, Luis G. Fuentes & Alex E. Álvarez (2013, marzo). Evaluación de factores camión de los vehículos comerciales de carga que circulan por la red vial principal colombiana. *Revista Facultad Ingeniería Universidad de Antioquia*, N.º 66.

universal de transporte interno de carga en el país, por lo que no es de esperar que la red vial se vea sobrecargada por el colapso de otro modo de transporte. Sin embargo, problemas eventuales en el sistema de oleoductos pudieran generar volúmenes no previstos de carrotaques por las carreteras nacionales que contribuirían al deterioro acelerado de los pavimentos por los cuales habrían de circular.

## SOLUCIÓN

El problema del deterioro prematuro de los pavimentos de la red nacional, aunque complejo por la cantidad de variables que involucra es, paradójicamente, de sencilla solución, teniendo en cuenta que las decisiones para enfrentarlo y superarlo se encuentran bastante centralizadas.

En el caso de la red a cargo del Invías, la responsabilidad recae de manera casi absoluta sobre los hombros de su director general, quien dispone de las herramientas y de la gobernabilidad para enfrentar con éxito casi todos los tentáculos del problema. La excepción insalvable la constituyen los eventos ambientales extraordinarios. En relación con la limitación de recursos presupuestales para atender oportunamente el mantenimiento, tal vez conviniera reducir el presupuesto destinado a la construcción de nuevas vías y asignarlo a las actividades de mantenimiento, a menos que, con el debido apoyo político que se supone debe tener un director del In-

vías, se pueda incrementar el volumen total de fondos. El Banco Mundial<sup>26</sup> recomienda que, para alcanzar un máximo de eficiencia, la política de mantenimiento vial debe coordinarse con el diseño y con la planificación de la construcción de las carreteras, y los costos durante el ciclo de vida útil de éstas se deben sopesar frente a los costos de operación de los vehículos que las utilizan. Para lograr esta coordinación se precisa, por supuesto, una buena base de datos, personal idóneo y técnicas de análisis satisfactorias.

En el caso de la red concesionada, la solución es aún más simple. Cada uno de los concesionarios dispone de los medios técnicos, económicos y legales para controlar los factores que dan origen al deterioro prematuro de los pavimentos (salvo los ambientales de fuerza mayor), gracias a su autonomía y a las escandalosas tarifas de peaje que pagamos los usuarios de las carreteras a su cargo.

## COLOFÓN

Sirvan de colofón las siguientes palabras de los destacados ingenieros mexicanos Alfonso Rico Rodríguez y Hermilo del Castillo<sup>27</sup>: “Las normas más ambiciosas de proyecto y la construcción más ambiciosa y costosa no bastan para garantizar la existencia de una obra de ingeniería útil, económica y duradera. Entre el proyecto y la obra o entre la construcción y la obra existen todo un conjunto de pasos y criterios que será preciso garantizar para llegar a un buen resultado”.

26. *Ibíd.*, nota 5.

27. Alfonso Rico Rodríguez & Hermilo del Castillo (1978). *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*, vol. 2. México: Editorial Limusa.

# Remoción de hierro en agua con alta concentración

## Iron removal from high-concentration water

JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>1</sup> - LEIDY KATHERINE CÁRDENAS REAL<sup>2</sup> - AMPARO CAROLINA CASTAÑEDA JIMÉNEZ<sup>3</sup>

1. Ingeniero civil. MEEE. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
2. Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
3. Ingeniera civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

jairo.romero@escuelaing.edu.co - ing.katherine.cardenas@gmail.com - caroccj@gmail.com

Recibido: 02/02/2014 Aceptado: 12/02/2014  
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

### Resumen

Uno de los mayores problemas para obtener agua potable es la remoción de hierro en aguas de aljibes y pozos de agua subterránea. En este artículo se presentan los resultados del tratamiento del agua de un manantial con un contenido de hierro de 7,27 mg/L. Se encontró que la combinación óptima de tratamiento para hierro fue la de coprecipitación con cloruro férrico y cal, aunque el tratamiento con alumbre y cal, con cloruro férrico, con permanganato de potasio y cal, y con cloro, también permiten la remoción requerida<sup>(1)</sup>.

**Palabras claves:** agua subterránea, remoción de hierro, coagulación de agua.

### Abstract

One of the main problems for obtaining drinking water is the removal of iron in springs and wells of groundwater. This article presents the results of the treatment of the water from a spring with a content of 7,27 mg Fe/L. It was observed that the best combination of treatment for iron was the coprecipitation with ferric chloride and lime, although the treatment with alum and lime, with ferric chloride, with potassium permanganate and lime, and with chlorine, also achieves the required removal<sup>(1)</sup>.

**Keywords:** groundwater, iron removal, water coagulation.

## INTRODUCCIÓN

El agua subterránea constituye alrededor del 97 % del agua dulce disponible en el planeta. El contacto prolongado del agua subterránea con los minerales de la corteza terrestre y su exposición a la actividad biológica introducen elementos en solución que, como el hierro, son comunes y hacen necesario su tratamiento. El hierro ferroso,  $\text{Fe}^{++}$ , es soluble en el agua; el hierro férrico,  $\text{Fe}^{+++}$ , es insoluble. El hierro ferroso del agua subterránea, cuando se pone en contacto con el oxígeno del aire, es oxidado en hierro férrico, formando hierro coloidal y produciendo color y turbiedad. El hierro, además, favorece el crecimiento de bacterias del hierro que producen depósitos y problemas de aguas rojas en el abastecimiento. El límite para hierro en agua potable es de 0,3 mg/L para prevenir problemas de tinciones en los accesorios de plomería, coloración de la ropa, aguas rojas y sabores indeseables.

La gran variedad de procesos disponibles para remoción de hierro hacen necesaria la realización de ensayos de tratabilidad para proveer el método más conveniente. El principio teórico del tratamiento es hacer insoluble el hierro mediante oxidación del hierro ferroso en hierro férrico, con ajuste de pH, usando oxidantes como oxígeno, cloro, dióxido de cloro, permanganato de potasio, con precipitación y filtración, así como coagulación y precipitación con coagulantes o con cal<sup>(2,5)</sup>.

## METODOLOGÍA

Las muestras de agua se tomaron del manantial de la finca La Margarita y se transportaron al Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería en garrafas de cinco galones cada una. Las muestras se almacenaron y analizaron de acuerdo con las especificaciones de los métodos estándar<sup>(3)</sup>.

El ensayo de tratabilidad se realizó mediante ensayos de jarras (figura 1), con soluciones de cloruro férrico y alumbre en una concentración de 10 mg/mL, de permanganato de potasio en concentración de 2 mg/mL, de cloro en una concentración de 0,4 mg/mL y de cal en una concentración de 1 mg/mL. Se ensayaron 42 jarras, seis por cada método, con los siguientes métodos de tratamiento: alumbre, alumbre y cal; cloruro férrico; cloruro férrico y cal; permanganato; permanganato y cal; y cloro.

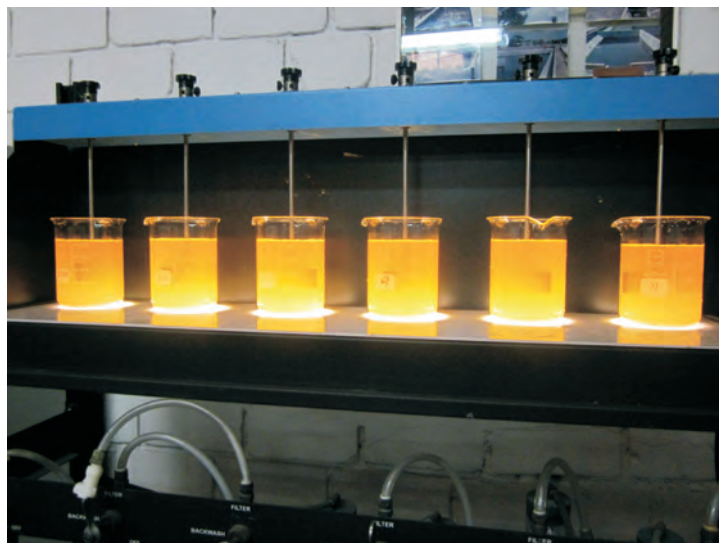


Figura 1. Ensayo de jarras.

## RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran los resultados de la caracterización del agua cruda y se compara su calidad con la norma colombiana para agua potable<sup>(4)</sup>. Los resultados obtenidos, en las jarras de mejor calidad de cada uno de los procesos de tratamiento con resultados satisfactorios de remoción de hierro, se incluyen en la tabla 2. En la figura 2 se ilustran los residuales obtenidos de hierro según el método.

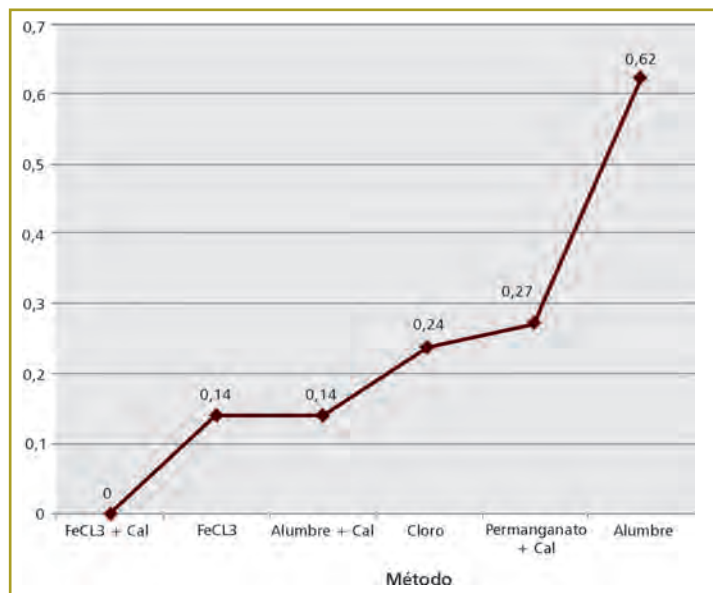


Figura 2. Concentración de Fe, según el método.

**Tabla 1**  
Caracterización del agua cruda

Parámetro	Unidad	Valor	Norma	Cumple/ No cumple
Acidez	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	18,7	-	-
Alcalinidad	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	21	200	Cumple
Calcio	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	22,4	60	Cumple
Cloro residual	mg/L- Cl <sub>2</sub>	0	5	Cumple
Cloruros	mg/L- Cl	1,77	250	Cumple
CO <sub>2</sub>	mg/L	18,7	-	-
Color aparente	UPtCo	275	15	No cumple
Color verdadero	UPtCo	45	-	-
Conductividad	μS/cm	70	1000	Cumple
Dureza total	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	42	300	Cumple
Fluoruros	mg/L- F	0	1	Cumple
Hierro total	mg/L- Fe	7,07	0,3	No cumple
Hierro soluble	mg/L- Fe	3	-	-
Magnesio	mg/L- CaCO <sub>3</sub>	19,6	36	Cumple
Manganeso	mg/L-Mn	0,4	0,1	No cumple
Nitratos	mg/ L-N	0,02	10	Cumple
Nitritos	mg/ L-N	0	0,1	Cumple
Nitrógeno amoniacal	mg/L-N	0,25	-	-
pH	Unidades	4,79	6,5-9,0	No cumple
Sólidos totales	mg/L	40	500	Cumple
Sulfatos	mg/L-SO <sub>4</sub>	4,1	250	Cumple
Turbiedad	UNT	168	2	No cumple

**Tabla 2**  
Resultados de ensayos de jarras

CALIDAD DEL AGUA CRUDA							
Fuente	Manantial La Vega						
Temperatura, °C	17,2						
Turbiedad, UNT	132						
Color, UPtCo	275						
Alcalinidad, mg/L	21						
pH	4,64						
Conductancia, μS/cm	70						
Hierro total, mg/L	7,27						
MEZCLA RÁPIDA							
RPM = 250		PERIODO = 1 minuto			G = 600 s <sup>-1</sup>		
MEZCLA LENTA							
RPM = 60		PERIODO = 15 minutos			G = 80 s <sup>-1</sup>		
CONDICIÓN		JARRA					
		1	2	3	4	5	6
COMPUESTO, mg/L	Alumbre	15	15	-	-	-	-
	Cloruro férrico	-	-	10	8	-	-
	Cal	-	8,4	-	8,3	3,4	-
	Permanganato	-	-	-	-	0,4	-
	Cloro	-	-	-	-	-	2
CARACTERÍSTICA	Floc	Regular	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
	Color	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno
CALIDAD DEL AGUA FILTRADA	Turbiedad	-	0,34	0,2	0,3	1,7	1,8
	Color	-	5	5	5	15	15
	pH	-	8	4,6	7,9	6,5	6,8
	Conductancia	-	141	74	95	68	76
	Hierro	0,62	0,14	0,14	0	0,27	0,24



## CONCLUSIONES

- El agua cruda del manantial La Vega, de la finca La Margarita, es un agua no potable, con un contenido muy alto de hierro total de 7,27 mg/L; además, requiere para su potabilización remoción de manganeso, color, turbiedad y ajuste de pH.
- El tratamiento con alumbre y cal; con cloruro férrico; con cloruro férrico y cal; con permanganato de potasio y cal; y con cloro; permiten reducir hierro, color y turbiedad a los valores admisibles de la norma colombiana de agua para agua potable<sup>(4)</sup>.
- La coprecipitación del hierro con alumbre y cal, así como con cloruro férrico y cal, son métodos eficientes en la remoción del hierro. Se obtuvo una remoción de hierro mayor del 98 %.
- La oxidación y precipitación del hierro con permanganato y cal es, también, un método factible para remoción de hierro, ya que permitió una remoción del 96 %.
- La remoción de hierro por medio de oxidación con cloro fue del 97 %. Por facilidad de operación y

mantenimiento, el método más elemental es el de oxidación, con 2 mg/L de cloro.

- La combinación óptima de tratamiento fue la de 8 mg/L de cloruro férrico con 8 mg/L de cal, debido a que con ello se obtuvo una remoción de hierro del 100 % y la mejor combinación para hierro y pH en el agua tratada.
- Es necesario continuar el estudio de tratabilidad del agua del manantial La Vega, con el objeto de confirmar los resultados para remoción de manganeso.

## REFERENCIAS

1. Cárdenas R. L. K. & Castañeda, J. A. C. (2011, diciembre). Remoción de hierro en aguas con alta concentración. Trabajo dirigido. Centro de Estudios Ambientales. Escuela Colombiana de Ingeniería.
2. Hernández, Y. A. (2012, diciembre). Estado del arte en remoción de hierro en el agua. Tesis de grado. Centro de Estudios Ambientales. Escuela Colombiana de Ingeniería.
3. APHA. AWWA (2011). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22.ª ed.
4. Ministerio de la Protección Social (2001). Resolución 2115 de 2007.
5. Romero Rojas, J. A. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

# Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes

Feasibility of designing a subsurface flow wetland for treating municipal wastewater of 30,000 inhabitants

CAMILO EDUARDO ESPINOSA ORTIZ<sup>1</sup> - JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS<sup>2</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería.
2. Ingeniero civil. MEEE. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

camiloespinoortiz@hotmail.com - jairo.romero@escuelaing.edu.co

Recibido: 12/02/2014 Aceptado: 20/02/2014  
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

## Resumen

En este artículo se analiza la factibilidad del diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de las aguas residuales municipales de una población de 30.000 habitantes, en comparación con un sistema de lagunas de estabilización. Dentro del análisis se incluyen antecedentes del uso de humedades para el tratamiento de aguas residuales y algunos criterios de diseño. Como resultado del análisis, se establece que el costo del humedal es mayor que el requerido para un sistema de lagunas de estabilización<sup>(1)</sup>.

**Palabras claves:** humedal artificial de flujo subsuperficial, aguas residuales, remoción de DBO, lagunas de estabilización.

## Abstract

This article analyzes the feasibility of designing a manmade sub-surface flow wetland for wastewater treatment for populations of 30,000 inhabitants in comparison with a system of stabilization ponds. Within the analysis some background of sub-surface wetlands and some criteria of design for wastewater treatment is included. As a result of the analysis, it is established that the cost of the wetland is greater than the required for a system of stabilization ponds<sup>(1)</sup>.

**Keywords:** manmade sub-surface flow wetland, wastewater, BOD removal, stabilization ponds.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las características sociales, topográficas, tecnológicas, demográficas, económicas y climáticas, entre otras, de las pequeñas y medianas poblaciones en Colombia y América Latina representan un reto a la hora de seleccionar tecnologías sostenibles para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, creando la necesidad de desarrollar herramientas que faciliten la toma de decisiones para la implementación de estos sistemas<sup>(2)</sup>, basados en tecnologías naturales de depuración, como humedales artificiales.

La problemática planteada se fundamenta en el acelerado crecimiento de la población y de los sectores agrícola e industrial en Colombia, los cuales demandan grandes cantidades de agua para el desarrollo de sus actividades; de acuerdo con las cifras del Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico en Colombia para el año 2011, efectivamente sólo el 9 % de las aguas residuales son tratadas, lo que evidencia el alto déficit de plantas de tratamiento que faltan por implementar en el país, generando problemas ambientales de saneamiento básico (salud, contaminación de suelos, aguas subterráneas, eutrofización de cuerpos de agua, etc.), principalmente en la conservación y protección de los ecosistemas acuáticos y del suelo en general. Así mismo, los altos costos que requiere la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales han sido uno de los principales obstáculos que se presentan para resolver dicha problemática<sup>(2)</sup>.

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas, con una frecuencia y duración que permitan mantener saturado el terreno. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm, con plantas emergentes tales como espadañas, carrizos y juncos. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar<sup>(3)</sup>.

Los sistemas diseñados para imitar las características y procesos (físicos, químicos y biológicos) de un humedal natural son comúnmente conocidos como “humedales artificiales” o “humedales construidos”. Los humedales artificiales son sistemas complejos e integrados en los que tienen lugar interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, energía solar,

suelo y aire, con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y proveer un mejoramiento ambiental<sup>(4)</sup>. Existen dos tipos: humedales artificiales de flujo libre y humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Se definen como humedales artificiales de flujo libre superficial (figura 1) aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. Los humedales artificiales de flujo libre consisten normalmente en una o más cuencas o canales de poca profundidad, que pueden o no tener un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática vulnerable a la contaminación, y una capa sumergida de suelo para soportar las raíces de la vegetación macrófita emergente<sup>(5)</sup>. Las ventajas y desventajas de un humedal artificial de flujo superficial se ilustran más adelante (tabla 1).

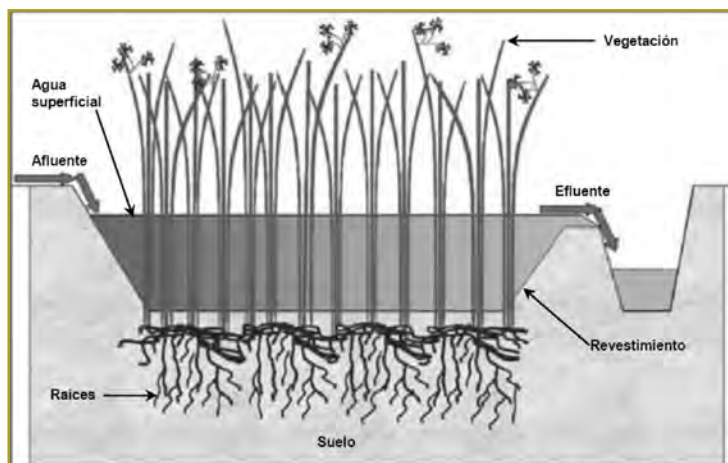
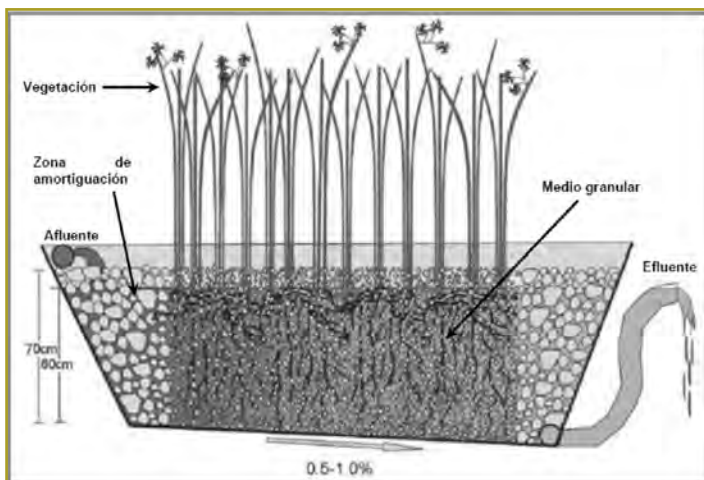


Figura 1. Esquema de un humedal artificial de flujo superficial.

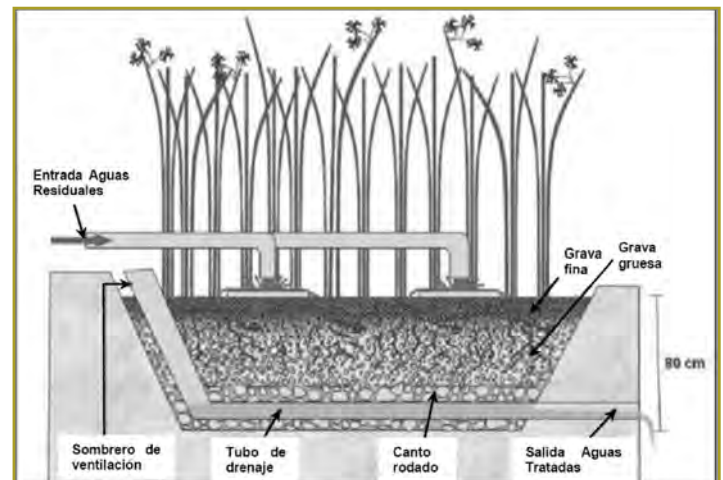
Los sistemas de flujo subsuperficial (figuras 2 y 3) están contruidos típicamente en forma de un lecho o canal que, al igual que el sistema de flujo libre, puede o no tener una barrera que impida la percolación del agua hacia el subsuelo; además, contiene un medio apropiado (grava, arena u otro material) que soporta el crecimiento de las plantas; la vegetación emergente es la misma que en el sistema de flujo libre. La profundidad del medio en estos humedales de flujo subsuperficial tiene un rango de 0,3 a 0,9 metros, siendo 0,6 metros el valor más común<sup>(4)</sup>. El nivel del agua está por debajo de la superficie del soporte y fluye únicamente a través del medio que sirve para el crecimiento de la película microbiana, que es la responsable en gran parte del

**Tabla 1**  
Ventajas y desventajas de un sistema de humedal artificial de flujo superficial<sup>(6)</sup>

Ventajas	Desventajas
Proporcionan tratamiento en forma efectiva y pasiva. Además, minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de personal especializado.	Las necesidades de terreno de estos humedales pueden ser grandes, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno.
Pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener que los procesos mecánicos de tratamiento.	El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
La operación de tratamiento secundario es posible durante todo el año, con excepción de los climas fríos. La operación de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semicálidos.	En climas fríos, las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación.
Proporcionan la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para la recreación pública.	La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo libre es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
No producen biosólidos ni lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.	Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema.
La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención.	



**Figura 2.** Esquema de un humedal subsuperficial de flujo horizontal.



**Figura 3.** Esquema de un humedal subsuperficial de flujo vertical.

tratamiento que ocurre al agua residual. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos, según la forma de aplicación de agua al sistema, ya sea de flujo vertical u horizontal<sup>(7)</sup>. Posteriormente se enumeran las ventajas y desventajas de un sistema de humedad de flujo subsuperficial (tabla 2).

Las plantas emergentes (tabla 3) que frecuentemente se encuentran en la mayoría de los humedales para aguas residuales son las espadañas, carrizos, juncos y juncos de laguna<sup>(3, 5, 7, 8)</sup>.

## ANTECEDENTES

En Europa existen más de 200 sistemas de humedales naturales y alrededor de 5000 humedales artificiales usados para el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. El primer sistema de tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales comenzó a operar en Inglaterra en octubre de 1985 para una población de 1260 habitantes y un caudal promedio de 189 m<sup>3</sup>/d; entre 1983 y 1988 se construyeron en Dinamarca más de 130 humedales artificiales, para poblaciones de

**Tabla 2**  
Ventajas y desventajas de un sistema de humedal de flujo subsuperficial<sup>(6)</sup>

Ventajas	Desventajas
Proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de personal especializado.	El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
Pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener que los procesos mecánicos de tratamiento.	Un humedal de flujo subsuperficial requiere un área extensa en comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento.
La configuración de los humedales de flujo subsuperficial proporciona una mayor protección térmica que los humedales de flujo libre.	La mayoría del agua contenida en los humedales de flujo subsuperficial es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco.
No producen biosólidos ni lodos residuales que requieran tratamiento subsiguiente y disposición.	En climas fríos, las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH <sub>3</sub> y NO <sub>3</sub> .
La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles puede ser también efectiva, con un tiempo de retención significativamente mayor.	Los humedales de flujo subsuperficial no se pueden diseñar para lograr una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias coliformes. Los ciclos ecológicos en estos humedales producen concentraciones naturales de esos compuestos.
Los mosquitos y otros insectos vectores similares no son un problema con los humedales de flujo subsuperficial, mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga.	Si bien los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de menor superficie que los humedales de flujo libre, para la remoción de la mayoría de los constituyentes del agua residual el costo mayor del medio de grava en los sistemas de flujo subsuperficial puede dar como resultado costos de construcción más altos para sistemas con una capacidad mayor de 227 m <sup>3</sup> por día (60.000 galones por día).

**Tabla 3**  
Plantas emergentes más utilizadas en humedales artificiales<sup>(2)</sup>

Especie	Nombre latino	Nombre común más usual	Temperatura, °C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
			Deseable	Germinación de las semillas		
Ciperáceas	<i>Carex sp.</i>	NA	14 - 32	NA	NA	5 - 7,5
	<i>Eleocharis sp.</i>	NA	NA	NA	NA	NA
	<i>Scirpus lacustris L. (*)</i>	Junco de laguna	18 - 27	NA	20	4 - 9
Gramíneas	<i>Glyceria fluitans (L.) R. Br.</i>	Hierba del maná	NA	NA	NA	NA
	<i>Phragmites australis (Caw)</i>					
	<i>Trin. Ex Steudel (*)</i>	Carrizo	12 - 23	10 - 30	45	2 - 8
Iridáceas	<i>Iris pseudacorus L.</i>	Lirio amarillo, espadaña fina	NA	NA	NA	NA
Juncáceas	<i>Juncus sp.</i>	Juncos	16 - 26	NA	20	5 - 7,5
Tifáceas	<i>Thypha sp (*)</i>	Eneas, aneas, espadañas	10 - 30	12 - 24	30	4 - 10

hasta 7100 habitantes con caudales del orden de 1065 m<sup>3</sup>/d; también se encuentran humedales artificiales funcionando en Bélgica, Holanda, Hungría, Suecia, República Checa y la India<sup>(7)</sup>.

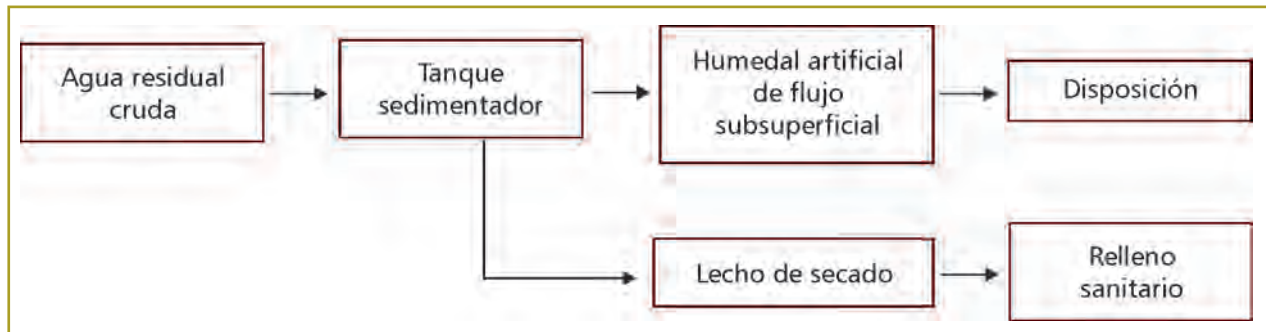
Los humedales proveen tratamiento eficiente de afluentes pretratados (tabla 4). En Colombia, el RAS 2000 establece que los humedales deben localizarse aguas abajo de un tanque séptico<sup>(8)</sup>.

**Tabla 4**  
Resultados del tratamiento de aguas residuales mediante humedales

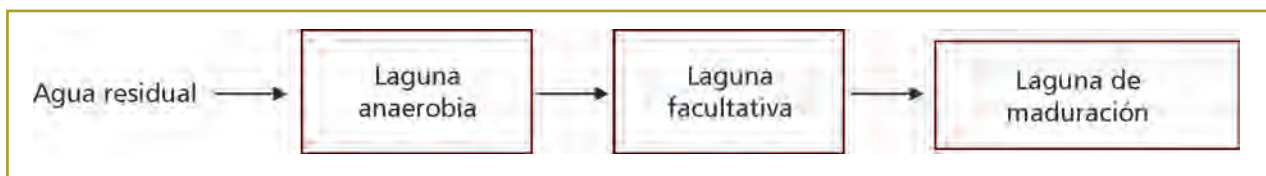
País	Ciudad	Población (hab.)	Caudal (m <sup>3</sup> /d)	Tipo de afluente	Remoción DBO5 (%)	Remoción DQO (%)	Remoción SST (%)
E.U.	California	30.000	9464	Secundario	82	-	77,6
E.U.	Arcata	19.056	8706	Secundario	-	-	-
España	Los Gallardos	1200	155	Secundario	75,5	-	96
España	Bustillo de Cea	400	66	Sin información	65,95	57,34	67,34
Perú	Lacabamba	1300	106	Secundario	48	-	96
Brasil	Botucatu	-	-	Secundario	-	88	80
Colombia	Tunja (prueba piloto)	-	2,2	Secundario	45,1	51,7	88,6
Colombia	Cogua, Cundinamarca (prueba piloto)	6	1,34	Secundario	80	-	44
Colombia	Escuela Colombia de Ingeniería Julio Garavito (prueba piloto) <sup>(16)</sup>	-	0,096	Secundario	52	70	-

## DISEÑO

A renglón seguido se ilustran los dos sistemas de tratamiento analizados (figuras 4 y 5).



**Figura 4.** Sistema de tratamiento utilizando un humedal artificial de flujo subsuperficial.



**Figura 5.** Sistema de tratamiento mediante lagunas de estabilización.

### Caudal de diseño

Como caudal de diseño se supone el caudal afluente promedio a la PTARM de municipios con aforos conocidos, 202 L/hab. • d. El caudal para 30.000 habitantes será:

$$\begin{aligned} \text{Caudal promedio} &= (202 \text{ L/hab.} \cdot \text{d}) (30.000 \text{ hab.}) = 6060 \text{ m}^3/\text{d} \\ \text{Caudal pico} &= (6060 \text{ m}^3/\text{d})(3) = 18.180 \text{ m}^3/\text{d} \end{aligned}$$

Las dimensiones del tanque sedimentador y de los lechos de secado que forman parte del sistema de tratamiento primario se presentan a continuación (tablas 5 y 6).

**Tabla 5**  
Dimensiones del tanque sedimentador primario<sup>(10)</sup>

Parámetro	Valor
Caudal pico, Q (m <sup>3</sup> /d)	18.180
Carga superficial, m/d	80
Profundidad del agua, m	3
Área tanque, A (m <sup>2</sup> )	227
Diámetro sedimentador, m	17
Carga de rebose sobre el vertedero, L/s•m	4,5
Longitud vertedero perimetral, L (m)	53
Verificación carga rebose sobre el vertedero, L/s•m	4,0 < 4,5
Volumen del tanque, V (m <sup>3</sup> )	682

**Tabla 6**  
Dimensiones del lecho de secado<sup>(10)</sup>

Característica	Valor
Área requerida	0,05 (m <sup>2</sup> /cap) (lecho con cobertura)
Borde libre	0,5 - 0,9 por encima de la arena
Espesores	- Capa de grava, 200 - 460 mm - Cara de arena, 300 - 460 mm
Granulometría	- Diámetro partículas de grava, 3 - 25 mm - Diámetro partículas de arena, 0,3 - 0,75 mm
Recolección de percolados	- Las tuberías de drenaje principal deben tener no menos de 100 mm de diámetro y una pendiente no menor de 1 %; deben espaciarse entre 2,5 y 6 m. - Se localizarán por debajo de la capa de grava con no menos de 150 mm de este material por encima de ellas. - Se recomienda que los canales laterales de alimentación de las tuberías principales tengan un espaciamiento entre 2,5 y 3 m.
Carga superficial	134 kg/ m <sup>2</sup> • año
Área requerida para 30.000 hab.	0,15 ha

La concentración de DBO en el afluente se calcula suponiendo los valores del título E (tabla E.2.6) del RAS 2000 (tabla 7).

El cálculo de las dimensiones del humedal artificial de flujo subsuperficial, utilizando cuatro modelos diferentes de remoción de DBO, se incluye más adelante (tabla 8).

**Tabla 7**  
Aportes per cápita para aguas residuales domésticas<sup>(11)</sup>

Parámetro	Intervalo	Valor sugerido
DBO 5 días, 20 °C, g/hab./día	25 - 80	50
Concentración DBO, mg/L para 30.000 habitantes		248
Concentración DBO, mg/L para 30.000 habitantes, removiendo un 40 % por el sedimentador primario		149

El diseño más económico corresponde al que conforma los criterios de diseño de la EPA, razón por la cual se selecciona esta alternativa para el análisis de factibilidad. Posteriormente se muestran las dimensiones del humedal (tabla 9).

Para el humedal diseñado se recomienda sembrar juncos (*Scirpus*), dado que son plantas capaces de penetrar hasta 6 cm en el lecho filtrante del humedal, donde la mayoría de las especies tienen un crecimiento moderado y pueden lograr un buen cubrimiento en

alrededor de un año, con separaciones cercanas a 0,3 m<sup>(3)</sup>.

Los principales elementos que se incluyen en los costos de inversión de los humedales de flujo subsuperficial son similares a los requeridos para los sistemas de lagunas. Éstos incluyen el costo del terreno, evaluación del sitio, limpieza del sitio, movilización de suelos, recubrimiento, medio de grava, plantas, estructuras de entrada y descarga, cercas, tuberías misceláneas, ingeniería, costos legales, contingencias, gastos fijos y ganancia del contratista<sup>(12)</sup>.

**Tabla 8**  
Resumen de resultados de diseño

Parámetro	Reed <sup>(8)</sup> , RAS	Kadlec <sup>(10)</sup>	EPA, 1988 <sup>(6)</sup>	Romero <sup>(11)</sup>
	Remoción de DBO	Remoción de DBO	Remoción de DBO	Remoción de DBO
	$A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_r(h)(\eta)}$	$A_s = \frac{Q}{K_A} \ln\left(\frac{C_o - C^*}{C_e - C^*}\right)$	$A_s = \frac{Q \ln\left(\frac{C_o}{C_e}\right)}{K_r(h)(\eta)}$	$A_s = \frac{V}{y} V = Q * t$
Área superficial del humedal, m <sup>2</sup>	A <sub>s</sub> = 28.049	24.290	19.171	40.400
Área de la sección transversal del lecho, m <sup>2</sup>	A <sub>t</sub> = 1263	1263	1263	1263
Ancho del humedal, m	a = 2104	2104	2104	2104
Longitud del humedal, m	l = 13,3	11,54	9,1	19,2
Concentración de DBO en el efluente, mg/L	C <sub>e</sub> = 30	30	30	3,3
Concentración de DBO en el afluente, mg/L	C <sub>o</sub> = 149	149	149	149
Profundidad promedio del sistema, m	h = 0,6	0,6	0,6	0,6
Constante de remoción, d <sup>-1</sup>	K <sub>g</sub> = 1,49	0,42 m/d	2,17	0,95
Conductividad hidráulica, m/d	K <sub>s</sub> = 480	480	480	480
Porosidad promedio del sistema	η = 0,32	0,32	0,32	0,32
Caudal, m <sup>3</sup> /d	Q = 6060	6060	6060	6060
Pendiente del lecho, fracción	S = 0,01	0,01	0,01	0,01
Temperatura, °C	T = 25	25	25	25
Tiempo de retención hidráulico, d	t = 2,8	2,4	1,9	4
Volumen humedal, m <sup>3</sup>	V = 16829	14574	11503	24240
Carga orgánica, kg/d	900	900	900	900
COS, kg/ha. • d	321	371	469	223

**Tabla 9**  
Dimensiones del humedal para el tratamiento de aguas residuales de 30.000 habitantes

Parámetro	Valor
Caudal, Q (m <sup>3</sup> /d)	6060
Área superficial, A <sub>s</sub> (ha)	1,91
Área transversal, A <sub>t</sub> (m <sup>2</sup> )	1263
Ancho, m (a)	2104
Largo, l (m)	9,10
Altura, h (m)	0,6
Pendiente del lecho, S (m/m)	0,01
Material lecho filtrante	Arena gruesa



**Tabla 10**  
Costos del humedal de flujo subsuperficial para 30.000 habitantes<sup>(13)</sup>

Elemento		Valor
Tanque sedimentador	Movimiento de tierra	\$5.675.000
	Concreto $f'c = 17,5$ Mpa	\$31.780.000
	Acero de refuerzo	\$27.300.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$15.000.000
Humedal artificial	Costo terreno	\$267.000.000
	Evaluación del sitio (topografía, geotecnia)	\$58.000.000
	Limpieza en el sitio	\$5.000.000
	Movimiento de tierra	\$229.200.000
	Recubrimiento	\$286.500.000
	Medio de grava	\$916.000.000
	Plantas	\$22.920.000
	Sembrado	\$7.400.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$20.000.000
Lecho secado de lodos	Costo terreno	\$21.000.000
	Movimiento de tierra	\$56.250.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$10.000.000
<b>Total</b>		<b>\$1.979.025.000</b>

En la tabla 10 se presentan los costos para la construcción del humedal artificial de flujo subsuperficial para 30.000 habitantes, con caudal de 6060 m<sup>3</sup>/día, de acuerdo con las dimensiones de la tabla 9, como también para el tanque sedimentador primario y el lecho de secado de lodos, basados en los costos de Construdata<sup>(13)</sup>.

Así mismo, se muestran los principales costos de inversión que requiere un sistema de lagunas convencional (tabla 12 y figura 10), cuantificando los valores para 30.000 habitantes, de acuerdo con las dimensiones obtenidas (tabla 11), con base en los costos de Construdata<sup>(13)</sup>.

Los costos de operación y mantenimiento de los dos sistemas de tratamiento se muestran en la página siguiente (tabla 13).

El costo evaluado de construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales para 30.000 habitantes mediante lagunas de estabilización es de \$1871 millones, mientras que el costo del humedal artificial de flujo subsuperficial es de \$1979 millones, es decir, superior en \$108 millones. El costo anual de operación del humedal será de \$86 millones y el de lagunas de estabilización de \$23 millones.

**Tabla 11**  
Dimensiones del sistema de lagunas para el tratamiento de aguas residuales de poblaciones de 30.000 habitantes

Parámetros de diseño	Laguna anaerobia	Laguna facultativa	Laguna de maduración
Tiempo de retención, (d) <sup>(14)</sup>	5	10	5
Profundidad, (m) <sup>(14)</sup>	3	2	1,5
Volumen, (m <sup>3</sup> ) <sup>(14)</sup>	30.300	60.600	30.300
Área, (m <sup>2</sup> ) <sup>(14)</sup>	10.100	30.300	20.200
COS, kg/Ha. d	1485	200	22

**Tabla 12**  
Costos del sistema de tratamiento de aguas residuales para 30.000 habitantes, utilizando lagunas de estabilización.

	Elemento	Valor
Laguna anaerobia	Costo terreno	\$141.400.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$7.500.000
	Costo excavación	\$250.000.000
Laguna facultativa	Costo terreno	\$424.200.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$7.500.000
	Costo excavación	\$500.000.000
Laguna de maduración	Costo terreno	\$282.800.000
	Estructuras de entrada y descarga	\$7.500.000
	Costo excavación	\$250.000.000
	<b>Total</b>	<b>\$1.870.900.000</b>

**Tabla 13**  
Costos de operación y mantenimiento<sup>(15)</sup>.

Sistema de tratamiento	Costo operación y mantenimiento (\$/año · habitante) <sup>(15)</sup>	Costo operación y mantenimiento para 30.000 habitantes (\$/año) <sup>(15)</sup>
Sistema de lagunas de estabilización	760	22.800.000
Humedales artificiales de flujo subsuperficial	2850	85.500.000

## CONCLUSIONES

- De acuerdo con los antecedentes relacionados, los humedales artificiales con espejo de agua predominan en Estados Unidos, en poblaciones de hasta 20.000 habitantes, debido a que requieren un menor costo de inversión que los humedales de flujo subsuperficial.
- Los humedales artificiales de flujo subsuperficial se han empleado principalmente en Europa y Estados Unidos; sin embargo, en Colombia es una tecnología nueva, y sólo se conocen experiencias de su utilización en el municipio de Macanal.
- Los humedales artificiales se usan como tratamiento secundario o terciario de aguas residuales municipales, lo que hace necesario implementar previamente tratamiento primario (sedimentadores, otros), con el fin de garantizar su adecuado funcionamiento y prevenir a largo plazo problemas de colmatación.
- Los modelos para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial presentan diferencias en el cálculo del área superficial de diseño y, por tanto,

en el tiempo de retención y en la carga superficial orgánica aplicada.

- Los costos de inversión que requiere la construcción de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales de 30.000 habitantes, en comparación con un sistema de tratamiento convencional de lagunas de estabilización, son superiores en un 6 %.
- El costo de operación y mantenimiento del humedal es superior en un 273 % al sistema de lagunas de estabilización.
- La diversidad en los criterios de diseño de humedales para el tratamiento de aguas residuales indica la necesidad de efectuar estudios que contribuyan a definir con mayor perfección sus valores.

## REFERENCIAS

1. Espinosa, O.C.E. (2014, enero). Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes. Trabajo de grado. Maestría en Ingeniería Civil. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

2. Bernal, D.P. (2000). *Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por medios naturales*. Universidad del Valle / Instituto Cinara.
3. Borrero L., J.A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Trabajo final (Máster en Ingeniería y Gestión Ambiental). Barcelona: Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña.
4. Osnaya, M. (2012). *Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra Juárez. México*: Universidad Sierra Juárez.
5. Delgadillo, Ó., Camacho, A., Pérez, L.F. & Andrade, M. *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA). Bolivia: Universidad Mayor de San Simón.
6. Usepa (U.S. Environmental Protection Agency) (1988, September). *Design Manual, Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*.
7. Estrada, I. (2010). Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías.
8. República de Colombia, Ministerio de Desarrollo Económico (2010). Resolución 1096/2000 de noviembre de 2000, por la cual se adopta el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. RAS 2000.
9. Reed, S.C., Crites, R.W. & Middlebrooks, E.J. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
10. Kadlec, R.H. & Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Raton: Lewis.
11. Romero R., J.A. (2004). *Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño*. 3.<sup>a</sup> ed. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
12. EPA (2000, septiembre). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales en humedales de flujo subsuperficial*.
13. <http://www.construdata.com>. Octubre de 2013.
14. Romero R., J.A. (2008). *Lagunas de estabilización de aguas residuales*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

# Ecología de ríos y quebradas

## Ecology of rivers and streams

BEATRIZ GAMBOA TILLOTSON<sup>1</sup> - ARTURO LIÉVANO LEÓN<sup>2</sup>

1. Profesora del Departamento de Ciencias Naturales de la Cátedra de Biología de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

2. Profesor del Programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad El Bosque.

beatriz.gamboa@escuelaing.edu.co - lievanoarturo@unibosque.edu.co

Recibido: 18/02/2014 Aceptado: 26/02/2014

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

### Resumen

En este texto se explica brevemente la ecología de ríos y quebradas, y se tratan temas relacionados con las características de los principales componentes de estos ecosistemas, como la cuenca hidrográfica, su geología y su cobertura vegetal, los aspectos fisicoquímicos del agua y su biota. También se ofrece una disertación sobre la importancia de la biodiversidad y la conservación de estos ecosistemas únicos. El presente artículo se escribe con el fin de apoyar la enseñanza, la comprensión y la investigación sobre la ecología y las ciencias ambientales de los ecosistemas lóticos.

**Palabras claves:** ecología de ríos, ecosistemas lóticos, limnología, calidad del agua dulce, fisicoquímica de los ríos, hidrobiología, conservación de la biodiversidad.

### Abstract

This article briefly explains the ecology of rivers and streams and includes topics related with the characteristics of the main components of these ecosystems, such as their hydrographic basin, its geology and its vegetation, the physicochemical aspects of the water, as well as its biota. It also offers a brief discussion about the importance of biodiversity and the conservation of these unique ecosystems. This article is written with the goal to support the teaching, understanding and research of ecology and environmental sciences of lotic systems.

**Keywords:** river ecology, lotic ecosystems, limnology, fresh water quality, river physicochemistry, hydrobiology, biodiversity conservation.

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas acuáticos abarcan los sistemas marinos, los estuarios y manglares, los lagos de aguas dulces y saladas, los humedales y los ríos y quebradas. Por supuesto, existen algunas similitudes en los patrones y procesos ecológicos que se producen en estos sistemas, pero algunos de éstos son únicos y característicos de los ríos y quebradas.

El estudio de las aguas corrientes continentales (ríos y quebradas) tuvo su origen en Europa a principios del siglo XX. Estos primeros estudios se concentraron en la taxonomía y algunas características ecológicas de sus organismos, tales como su distribución y abundancia (Thieneman, 1912, 1925; Carpenter, 1928; Wassenberg-Lund, 1943). Durante los años cincuenta, los estudios de la ecología de ríos y quebradas fueron principalmente descriptivos y autecológicos. En América, éstos comenzaron en Estados Unidos también a principios del siglo XX, siguiendo los trabajos europeos de Shelford (1914; Shelford & Eddy 1929), y concentrados principalmente en la biología de las pesquerías, dada su importancia económica.

La situación actual de estos ecosistemas en Colombia se podría calificar de crítica. El deterioro de la calidad del agua, sobre todo desde el punto de vista microbiológico (presencia de bacterias coliformes), es un fenómeno generalizado especialmente en las cuencas hidrográficas de la zona andina del país, por debajo de los 3000 msnm. Por supuesto, en aquellas cuencas en las que se ubican los principales centros urbanos, el vertimiento de aguas residuales domésticas e industriales acentúa de manera muy importante este problema, con la adición de todo tipo de vertimientos químicos y desechos sólidos a los cursos de aguas. Otro aspecto que hay que considerar en la disminución de la calidad del agua de ríos y quebradas son las actividades agrícolas y pecuarias, las cuales, además de aportar cantidades importantes de materia orgánica, ya sea por escorrentía, vertimientos directos o uso excesivo de abonos orgánicos, también pueden aportar cantidades no determinadas de residuos de plaguicidas provenientes de los cultivos a las aguas superficiales y subterráneas, más si se tiene en cuenta que de acuerdo con el Estudio Nacional del Agua (ENA), realizado por el Ideam en el 2005, estas actividades participan con más del 60 % de la demanda de agua del país.

Con respecto a la disponibilidad de agua, el ENA muestra de manera alarmante la disminución que ha sufrido este recurso en el país. Si antes considerábamos a Colombia una potencia hídrica mundial, el ENA actualmente nos ubica en el puesto 24 de un listado de 182 países. La disponibilidad per cápita de agua en Colombia es hoy de 40.000 metros cúbicos al año, pero se estima en este estudio que para el año 2020 esta disponibilidad per cápita caerá a los 1890 m<sup>3</sup> por año. Ahora, si tenemos en cuenta que la oferta del recurso hídrico para el abastecimiento de agua potable depende tanto de la disponibilidad (en términos de caudal) como de la calidad (en términos de su contaminación), la situación es aún más precaria, al pensar que la poca agua disponible estará contaminada. Actualmente, en Colombia se estima que más del 70 % de los municipios del país tienen problemas de agua, ya sea por disponibilidad o calidad (Sivicap - INS, 2012).

Los efectos más dramáticos que hemos causado sobre estos ecosistemas involucran cambios continuos y directos sobre la química del agua, por medio de su eutrofización y acidificación, alteraciones a largo plazo de la morfología de ríos y quebradas y de sus hábitats a través de la regulación y canalización de su flujo, la disminución de los niveles de las aguas freáticas, la destrucción de sus zonas riparias y la introducción de especies exóticas. Estos efectos se dan en algunos tributarios de las cuencas o incluso en cuencas enteras, como es el caso de los ríos Bogotá y Magdalena, por nombrar sólo algunos ejemplos. La contaminación accidental o intencional de las aguas de ríos y quebradas también se ha incrementado en la medida en que éstos se han vuelto más importantes como receptáculos de los efluentes industriales y domésticos.

Sabemos que las aguas corrientes, si la contaminación no es muy fuerte, tienen una alta resistencia a los cambios e incluso tienen una alta capacidad de auto-depuración con el tiempo o con la distancia desde su nacimiento. Sin embargo, una entrada de contaminantes de manera extensiva, concentrada o continua, puede acabar con la capacidad innata de estos ecosistemas. Hoy en día sabemos también que los organismos acuáticos pueden usarse como “barómetros” de medición de estos cambios (por ejemplo, usando índices de biodiversidad o sistemas como el BMWP) y que estos organismos son testigos de los impactos que causan los contaminantes, ya sean físicos o químicos.

Las aguas corrientes varían en tamaño, desde pequeños riachuelos de unos pocos centímetros de ancho en su nacimiento, hasta ríos de enorme tamaño como el Amazonas, que recorre más de 6000 km en longitud y alcanza más de 3 km de ancho en algunos lugares. Así mismo, los ríos pueden variar desde cursos de aguas torrenciales, con cascadas en las cabeceras y en las partes altas de las montañas, hasta las áreas de las partes bajas con aguas de lento movimiento de los grandes ríos.

Además de su importancia como fuentes de recursos pesqueros y de su belleza escénica, los ríos y quebradas están llenos de otras formas de vida que no son tan evidentes. Los orígenes evolutivos de muchos de los organismos presentes hoy en día en ríos y quebradas son muy diferentes de los que se encuentran en sistemas marinos y un número importante de grupos marinos no están en éstos. Los ríos y quebradas fueron la vía por la cual muchos animales del mar se desplazaron hacia la tierra (Thorp & Covich, 1991). Sin embargo, algunos de los grupos dominantes en las aguas dulces en el presente (especialmente los insectos) invadieron estos ecosistemas desde la tierra y no desde el mar.

Adicionalmente, los ríos y quebradas han sido ecosistemas mucho más permanentes en el tiempo que la mayoría de los hábitats lacustres o lénticos, lo cual ha conducido al desarrollo de una flora y fauna únicas de estos ecosistemas; por esto, muchos de los grupos actuales de invertebrados de aguas dulces se encuentran únicamente en ellos.

Las aguas corrientes proveen también una amplia gama de servicios a las comunidades humanas, desde la provisión para agua potable, hasta su uso como conductos para la eliminación de efluentes industriales, domésticos y agrícolas. Las variaciones en la calidad del agua que estos procesos producen y los requerimientos necesarios para el mantenimiento de la biodiversidad de sus comunidades naturales han llevado a todo tipo de conflictos acerca del manejo y conservación de estos ecosistemas (Giller & Malmqvist, 2006).

El conocimiento de cómo funcionan estos ecosistemas únicos de agua dulce exige un trabajo de visión y manejo de cuenca. Un trabajo interdisciplinario que incorpore información sobre los referentes de su geomorfología, hidrología, fisicoquímica del agua, sistemas de bioindicadores relacionados con la calidad del agua utilizando macroinvertebrados, así como los resulta-

dos de análisis bacteriológicos, complementado con la comprensión de los aspectos ecológicos y biológicos.

### EL AGUA DULCE EN EL PLANETA TIERRA

En el ámbito mundial, los ríos y quebradas drenan un área de tierra cercana a los 150 millones de km<sup>2</sup>, y el promedio mundial del volumen de agua transportado por los ríos y quebradas supera, en un momento dado, los 2000 km<sup>3</sup>. Esto puede parecer mucho, pero representa apenas una pequeñísima parte de los recursos de agua dulce del planeta; la mayoría del agua dulce está contenida en los polos (principalmente en la Antártida) y el resto en aguas subterráneas, en el suelo, en la atmósfera, en lagos y humedales y en los seres vivos. El agua dulce, en sí misma, representa sólo una pequeña proporción de los recursos totales de agua del planeta (< 3 %); la enorme mayoría del agua se encuentra en mares y océanos (> 97 %).

**Tabla 1**  
Distribución mundial de las fuentes de agua dulce (Keller, 1984)

	Proporción de fuentes de agua dulce (%)	Contribución al total del agua en el planeta (%)
Capas polares, glaciares y permafrost	69,56	1,761
Aguas subterráneas y del suelo	30,1	0,76
Atmósfera	0,04	0,001
Lagos de agua dulce	0,26	0,007
Pantanos y humedales	0,03	0,0008
Ríos y quebradas	0,006	0,0002
Agua biológica	0,003	0,0001

Existe un rápido recambio del agua en ríos y quebradas, con un tiempo de residencia promedio en estos sistemas (tiempo que toma el remplazo total del agua) de siete a catorce días. Se estima que un total de 30.000 km<sup>3</sup> de agua son descargados por todos los ríos del mundo hacia los océanos cada año (Milliman, 1990), de los cuales un 40 % corresponden a los diez ríos más grandes del planeta. La mayor parte proviene de las áreas tropicales y subtropicales, donde se dan las mayores precipitaciones.

Este rápido recambio del agua de ríos y quebradas está determinado por el ciclo hidrológico, el cual in-

volucra el reciclaje continuo del agua dentro de varios compartimientos en la biosfera. Esta reposición se produce a partir de la precipitación. De manera simple, este proceso empieza con la evaporación del agua desde los océanos y en la tierra, y la evapotranspiración de la vegetación terrestre hacia la atmósfera, causada por la energía solar. Luego los vientos transportan este aire húmedo, el cual al saturarse forma nubes, y el vapor de agua se condensa en gotas o cristales de hielo alrededor de partículas de polvo, humo o sal (Giller & Malmqvist, 2006). A medida que esta carga de agua se acumula, cae hacia la tierra como precipitación, particularmente cuando las nubes son forzadas a elevarse por zonas montañosas. El promedio global de lluvias es de cerca de 1030 mm al año. En un momento dado, la atmósfera tiene sólo suficiente agua para satisfacer la precipitación anual del Amazonas (Keller, 1984), pero hay un rápido reciclaje del agua en la atmósfera de aproximadamente nueve días.

La proporción de la precipitación que termina en los ríos y quebradas depende del clima, el tipo de suelo y su desarrollo, la vegetación, la pendiente, las propiedades de los acuíferos (aguas subterráneas) y otros factores locales. Leopold (1962) calculó que de 760 mm de lluvia en promedio anual en Estados Unidos sólo 230 mm (35 %) termina en el cauce de los ríos. Muy poca lluvia cae directamente a los ríos y quebradas. Parte de la precipitación es interceptada por la vegetación antes de alcanzar el suelo y se evapora. Otra parte pasa a través de la vegetación hasta el suelo, donde es absorbida por las raíces de las plantas y regresa a la atmósfera por evapotranspiración.

La desecación del suelo por evaporación aporta también agua a la atmósfera, además de que el agua percola a través del suelo a las aguas freáticas y recarga las aguas subterráneas; así mismo, la precipitación se puede retener como nieve o hielo durante el invierno de las zonas templadas, al igual que en las zonas altas de las montañas en el trópico. El resto drena hacia los ríos y quebradas. Si los suelos tienen baja permeabilidad, ya sea porque son áridos o están congelados o compactados o saturados de agua, y si la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo, la lluvia puede viajar superficialmente directo a los ríos y quebradas, pero este flujo superficial es relativamente raro. La lluvia que percola dentro del suelo puede fluir justo por debajo de la superficie del suelo (flujo subsuperficial) si hay

una capa impermeable entre la superficie del suelo y las aguas freáticas. La lluvia que se infiltra profundamente en el suelo puede liberarse de manera más lenta desde las fuentes de agua subterránea hacia los cursos de agua por debajo de la superficie de éstos. No se debe olvidar que muchos de los nacimientos de las aguas superficiales están en sitios donde las aguas subterráneas emergen directamente a la superficie de la tierra. El ciclo hidrológico se completa con el flujo del agua hacia las partes bajas, donde finalmente alcanzan el mar.

Una importante conclusión de esta descripción simple del ciclo hidrológico no es sólo que los ríos y quebradas se alimentan de aguas de diferentes fuentes, sino también que el agua misma ha tenido un contacto íntimo con la atmósfera, la vegetación, el suelo y las rocas, antes de llegar a los ríos y quebradas; así mismo, esto determina sus características fisicoquímicas, al igual que los tipos de comunidades biológicas que pueden desarrollarse en ellos.

## CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Hasta hace relativamente poco tiempo, los biólogos de aguas dulces consideraban que los límites de los ríos se extendían solamente desde la interfase agua - aire, hasta el lecho del río o quebrada. Hoy en día, se considera que existen una serie de interacciones dinámicas entre el cauce del río y el área circundante. La cuenca o área de drenaje del río se considera una unidad que abarca el área total de los terrenos drenados por varios tributarios y el río principal. Los movimientos del agua y los elementos a través de la cuenca unen varios componentes de este sistema: bióticos y abióticos, terrestres y acuáticos, plantas y suelos, atmósfera y vegetación, y suelos y agua (Hornung & Reynolds, 1995). Las características del paisaje determinan el movimiento del agua dentro de la cuenca y las formas del terreno, tales como filos y colinas delimitan la extensión de la cuenca y la separan de otras.

Muchos tipos de corrientes de agua obtienen una parte considerable de su energía a partir de la materia orgánica producida en otros ecosistemas (materiales autóctonos), en forma de detritus (materia orgánica muerta como hojas, ramas, etc.) proveniente del ecosistema terrestre adyacente. Al moverse del canal del río hacia la tierra, se cruza la “zona riparia”, la cual es una importante frontera entre los ecosistemas acuáticos y

terrestres. La zona riparia (la cual incluye la ronda del río y su vegetación) no solamente aporta materia orgánica al río, sino que también influye en los niveles de luz y temperatura, por la sombra que genera la vegetación, afectando así la producción de las plantas acuáticas y algas que se encuentran en el río (materiales autóctonos). Esta zona controla también la erosión de las orillas y el aporte de sedimentos al río. A medida que las quebradas se convierten en grandes ríos, la influencia de la zona riparia disminuye, haciendo que la importancia relativa de las fuentes de energía alóctonas frente a las autóctonas cambie en la parte baja de los ríos.

Ya que el agua que llega a los ríos y quebradas ha estado en contacto con los suelos de la cuenca, éstos –y en últimas la geología de la cuenca– tienen una influencia primordial en la química del agua. Así, aquellos cursos de agua que corren sobre cuencas conformadas por rocas ígneas (como granitos y basaltos) usualmente tienen bajos niveles de sales disueltas y bajos valores de pH, mientras que aquellos que fluyen sobre rocas sedimentarias (areniscas y calizas) pueden tener altos niveles de sales disueltas, con valores de pH circunneutros o básicos. Los niveles de calcio y pH tienen una influencia directa en las comunidades de plantas y animales. La vegetación presente en la cuenca influye en la concentración de iones (tales como el calcio y el magnesio) en el suelo, al igual que las tasas a las que estos iones son liberados a los ríos y quebradas. La vegetación terrestre, en particular las coníferas (como los pinos) acidifican el agua lluvia que llega a los suelos a través de éstas (Giller & Malmqvist, 2006).

El patrón de movimiento del curso de agua está influenciado por la pendiente de su cuenca, la profundidad y permeabilidad de los suelos y el patrón local de precipitación. La vegetación de la cuenca también incrementa el movimiento del agua desde el suelo hacia la atmósfera por evapotranspiración, creando más espacios de acumulación de aguas subterráneas, haciendo que una menor cantidad del agua lluvia alcance el cauce de los cursos de agua. Los bosques pueden reducir la cantidad de agua que llega a los cauces de los ríos y quebradas hasta en un 30 %, en comparación con cuencas deforestadas (Cushing et al., 2006).

Las interacciones entre el agua y la tierra no son siempre de una sola vía. Los ríos con extensas zonas de inundación, como las zonas de várzea en grandes ríos como el Amazonas, depositan sedimentos ricos

en nutrientes cuando inundan estas zonas, creando hábitats acuáticos altamente productivos, en especial para los peces.

Las aguas corrientes generan también interacciones entre los ecosistemas terrestres y marinos. A través de la erosión y transporte de sedimentos, se estima que los ríos del mundo aportan aproximadamente 13.700 millones de toneladas de sedimentos a los océanos cada año, principalmente al océano Índico y al mar de la China (Milliman & Meade, 1983). Los ríos y quebradas transportan también sólidos disueltos, con una concentración promedio de  $120 \text{ mg L}^{-1}$  (Cushing et al., 2006).

## FISICOQUÍMICA DEL AGUA DE LOS RÍOS Y QUEBRADAS

### Oxígeno disuelto

El oxígeno es un elemento fundamental para la respiración de todos los organismos aeróbicos, ya que es 30 veces menos concentrado en el agua que en el aire. Éste entra en el agua principalmente desde el aire, por difusión a través de la superficie del agua.

La solubilidad del oxígeno en el agua es inversamente proporcional a la temperatura (a mayor temperatura, menor es la solubilidad del oxígeno en el agua y viceversa). El agua pura en equilibrio con el aire, a una presión atmosférica estándar, tiene una concentración de oxígeno disuelto (OD) de  $12,77 \text{ mg L}^{-1}$  a  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , pero sólo  $8,26 \text{ mg L}^{-1}$  a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (Wetzel, 1983).

La concentración de OD en el agua varía también con la velocidad de la corriente y la turbulencia; quebradas pequeñas no contaminadas, de flujo rápido y turbulento, están generalmente saturadas de OD, mientras que sitios donde el agua se encuentra estancada y sí poseen un alto contenido orgánico, como hojas muertas, tendrán bajas concentraciones de OD.

La presencia de vegetación acuática también afecta los niveles de OD en el agua, ya que el oxígeno es un subproducto de la fotosíntesis. Sitios con gran densidad de vegetación acuática pueden presentar una sobresaturación de OD durante el día, aunque en la noche se puede presentar una importante disminución en el OD y aumento de la concentración de  $\text{CO}_2$  debido a la ausencia de fotosíntesis y a la continuación del proceso de respiración. En algunos ríos y quebradas, la concentración de OD puede variar de 36 a 164 % de saturación en un periodo de 24 horas (Moss, 1988).



Otro factor que afecta la concentración de OD en ríos y quebradas es la entrada de aguas subterráneas en éstos, ya que las aguas subterráneas son generalmente pobres en OD.

Así mismo, puede haber variaciones locales en la concentración de OD dentro de un mismo curso de agua. Como regla general, las concentraciones de OD disminuyen en las partes bajas de ríos y quebradas, ya que los tramos altos suelen ser más turbulentos y fríos.

Por último, pueden producirse concentraciones peligrosamente bajas de OD en el agua por la combinación de los parámetros antes mencionados: en sitios con alta contaminación orgánica, elevada temperatura, baja velocidad y turbulencia, y alta densidad de vegetación acuática, la concentración de OD puede ser muy baja.

### Temperatura

La mayoría de las plantas y animales de agua dulce son poiquiloterms, o sea, que su temperatura corporal depende de la temperatura del medio que los rodea. De esta manera, los procesos fisiológicos de la biota de ríos y quebradas, tales como la respiración, digestión, actividad muscular, fotosíntesis, etc., dependen de la temperatura del agua. Aspectos como las tasas de crecimiento, productividad y duración de los ciclos de vida dependen también de la temperatura del agua.

El agua de ríos y quebradas es calentada por la radiación solar que se difunde a través del aire y del mismo sustrato. Igualmente, el agua pierde calor por radiación de la superficie, por evaporación y por conducción hacia el sustrato.

El agua tiene un alto calor específico (la energía calórica necesaria para aumentar una masa dada de agua en 1 °C es mayor que en otras sustancias), lo que significa que el agua toma más tiempo en calentarse o en enfriarse que el aire. Si se mide la temperatura del aire y del agua en una quebrada durante un periodo de 24 horas, podrá verse que ésta varía muy poco en el agua comparada con la del aire. Las variaciones diarias de temperatura son mayores en quebradas pequeñas y turbulentas que en ríos grandes y profundos. Por ejemplo, la parte baja del río Amazonas se encuentra siempre a una temperatura promedio de 29 °C. Se da también un patrón general de incremento de la temperatura en la medida en que el agua se aleja del sitio de nacimiento del

río o quebrada, especialmente cuando éste se encuentra en zonas altas (en Europa han medido que el aumento de la temperatura del agua de ríos y quebradas es más o menos proporcional al logaritmo de la distancia del nacimiento).

La sombra generada por la vegetación riparia afecta también la temperatura del agua de ríos y quebradas. Las zonas de cañones profundos tienen un efecto similar.

### Luz

La radiación solar es la principal fuente de energía en las aguas dulces y las cantidades de luz que llegan a ellas influyen directamente las poblaciones de plantas y las tasas de producción primaria. La cantidad de radiación solar que llega a las plantas depende de la época del año, la geografía, la altitud, el estado de la atmósfera, al igual que de factores locales, tales como la profundidad y la turbidez del agua.

A nivel tropical, en un día sin nubes, la radiación solar alcanza los  $2,16 \text{ kJ cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , con una variación anual de apenas  $\pm 133 \text{ J cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ . Una cantidad importante de luz se pierde por reflexión cuando ésta incide en la superficie del agua. La cantidad de luz reflejada depende del ángulo de incidencia, el cual a su vez varía con la altura del sol en el cielo (cuanto más pequeño sea el ángulo de incidencia, mayor será la cantidad de luz reflejada). Esto varía con la latitud y la hora del día, y también puede estar influenciado por la orientación del curso de agua en relación con el movimiento del sol a través del cielo. Una vez que la radiación solar penetra la superficie del agua, la turbidez y el color de ésta afectan su transmisión hasta el sustrato. Por lo general, la radiación solar tiende a declinar logarítmicamente con la profundidad (ley de Beer).

### Vegetación riparia

La vegetación riparia que bordea los ríos y quebradas afecta la disponibilidad de luz y su temperatura, en cuanto la sombra que ésta produce. La luz que alcanza a los autótrofos de los cursos de agua es inversamente proporcional al desarrollo de la vegetación riparia de sus orillas. Los cursos de agua de 1.º y 2.º orden pueden recibir sólo entre 5 y 10 % de la luz solar, mientras que en aquellos ríos relativamente someros de 9.º orden, hasta un 46 % de la luz solar puede alcanzar el fondo.

En bosques húmedos tropicales, la copa de los árboles reduce hasta un 1 % la cantidad de luz solar que alcanza el piso del bosque y así mismo la superficie de los cursos de agua (Lewis et al., 1995).

La vegetación riparia define también la cantidad y naturaleza de la materia orgánica particulada que llega a ríos y quebradas, la cual es una parte muy importante y a veces predominante de la fuente de energía y ciclos de nutrientes de sus cadenas tróficas.

La vegetación presente en la cuenca influye en la calidad de sus aguas superficiales de muchas maneras. La vegetación tiene la capacidad de captar o interceptar iones químicos de la atmósfera en la superficie de las hojas, y estos iones, así concentrados, son luego lavados de la vegetación por la lluvia, llegando a los suelos y a las aguas subterráneas. La escorrentía y el flujo subsuperficial del agua (la cual sufre más modificaciones en el suelo) llevan estos iones hasta las quebradas y ríos. Así mismo, la vegetación riparia tiene también la capacidad de retener nutrientes de los suelos de la cuenca, antes de que éstos alcancen los cursos de agua.

Por medio de la evapotranspiración, la vegetación riparia y la de la cuenca influyen en las cantidades de agua que llegan a sus quebradas y ríos y, por consiguiente, en los caudales de éstos. La deforestación en las cuencas puede causar disminuciones de un 10 a un 30 % en los caudales de sus cuerpos de agua (Hornung & Reynolds, 1995; Guiller et al., 1993).

Por último, la vegetación riparia tiene influencia sobre la morfología física del cauce de los cuerpos de agua e incluso en sus patrones de drenaje por diferentes factores, como la estabilización de las orillas por las raíces de las plantas, formación de represamientos parciales o completos por la acumulación de restos vegetales, cambios en la estructura de pozas y raudales por la caída de árboles, la acumulación de hojas y palos brindan refugio a macroinvertebrados y peces. De hecho, está demostrado que el aporte de todo este material vegetal a los cursos de agua por la vegetación riparia tiene efectos positivos en la biodiversidad de invertebrados y la biomasa de los peces (Bison & Sedell, 1984; Smock et al., 1992).

### El sustrato

El sustrato comprende en sí mismo, una gran variedad de materiales inorgánicos y orgánicos. El material in-

orgánico varía en tamaño desde las partículas del limo, la arena, gravas, piedras y grandes rocas, las cuales han sido erosionadas desde las vertientes de la cuenca y el mismo canal del río y modificadas por la corriente. El material orgánico comprende desde fragmentos orgánicos, hojas, palos y árboles caídos, hasta plantas acuáticas tales como algas, musgos y macrofitas.

La gran mayoría de los invertebrados acuáticos de ríos y quebradas son bénticos, de aquí que la naturaleza y características del sustrato sean de primordial importancia, ya que proveen un sinnúmero de hábitats para el desarrollo de estos organismos.

### Química del agua y la cuenca

La biología marina trabaja en un medio que presenta variaciones en su composición química y salinidad relativamente pequeñas. El agua de mar tiene en general una salinidad de 35 g L<sup>-1</sup>.

Las aguas dulces, en comparación, son extremadamente diluidas; los ríos tienen una media global de salinidad entre 0,1 y 0,12 g L<sup>-1</sup> (Berner & Berner, 1987) y un rango que varía desde 0,01 hasta 0,5 g L<sup>-1</sup> (Ward, 1992b). Sin embargo no es posible generalizar que estos datos sean característicos de ríos y quebradas, pues dependen de la interrelación de muchas variables que son únicas para cada cuenca e incluso para cada subcuenca. Entre estas variables se pueden mencionar:

- La composición química inicial del río o quebrada, la cantidad y distribución de la precipitación relacionada con la proximidad a la costa o a industrias y el clima.
- La naturaleza de la cuenca y el movimiento del agua desde su cuenca de captación hasta el río, relacionado con la topografía, geología, suelos y vegetación, así como los aportes de aguas subterráneas.
- La distancia desde el nacimiento y el tiempo (estación, hora del día o tiempo desde la última lluvia).
- La influencia de actividades humanas y uso de los suelos en el área de la cuenca, tales como agricultura, cobertura vegetal y urbanización.

Un río típico es esencialmente una solución diluida de bicarbonato de calcio, dominada por unos pocos cationes y aniones (Wetzel, 1983). Otras variables importantes que hay que considerar son el pH, el cual

mide la acidez del agua (concentración de iones  $H^+$ ), la dureza (la cual mide la concentración de iones de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ), la conductividad (que mide el contenido iónico total) y la alcalinidad (que mide la concentración de carbonatos).

### Agua lluvia

El agua lluvia contiene una gran variedad de sustancias disueltas, aunque es más diluida que el agua de los ríos y quebradas ( $0,020 - 0,040 \text{ g L}^{-1}$  en promedio Burgis & Morris, 1987). El agua lluvia es normalmente una solución débil de ácido carbónico, con un pH de 5,64, debido al dióxido carbónico atmosférico disuelto en gotas. La contaminación atmosférica, la cual puede viajar grandes distancias desde la fuente, puede aumentar la acidez del agua lluvia debido a la disolución de gases de  $SO_2$  y  $NO$ , lo cual produce ácido sulfúrico y ácido nítrico, generando la llamada “lluvia ácida” con valores de pH de 2,1 a 2,8, medidos en Estados Unidos y Escandinavia.

Las sales marinas, especialmente en forma de iones de  $Na^+$ ,  $Cl^-$  y  $Mg^{2+}$ , llegan a la atmósfera en espray y también pueden transportarse grandes distancias, pero por supuesto sus niveles tienden a disminuir con el aumento de la distancia al mar. Es así como el agua lluvia que llega a los continentes tiene la composición química compleja de un solución diluida de agua de mar débilmente ácida, modificada por polvo (Moss, 1998).

### Efectos de la vegetación

Como se mencionó anteriormente, la vegetación en general, pero sobre todo los árboles, captan iones (incluyendo sales marinas y contaminantes) del aire. Este proceso es especialmente importante en regiones altas, cerca de las cabeceras de la mayoría de los ríos y quebradas. Las coníferas en particular tienen una gran capacidad de captar estos iones, mayor que otros tipos de árboles (Gee & Stoner, 1989). Varios iones llegan a las hojas directamente por el agua lluvia y también por deposición, e incrementan su concentración por evaporación. La precipitación que alcanza el suelo a través de la vegetación recoge estos iones adicionales, adquiriendo una composición química diferente y una mayor concentración de algunos iones que el agua lluvia original. Una vez que esta agua alcanza el suelo, la absorción por las raíces aumenta aún más la concentración de iones y los procesos que se dan dentro del suelo, tales como el intercambio catiónico, la mineralización de materia orgánica y mineral y la toma de agua por organismos, contribuyen al cambio de la composición química de lo que ahora se llamaría agua del suelo.

Otro efecto de la vegetación se da en la toma selectiva de iones y nutrientes presentes en el suelo. Este efecto se puede ver claramente en el aumento de la concentración de nitratos, potasio y fósforo en las corrientes de agua en las que se ha removido su vegetación riparia. Por consiguiente, la revegetación de las cuencas, en particular de las rondas de los ríos y quebradas, li-

**Tabla 2**  
Efecto del uso del suelo y el tipo de cuenca en la química del agua superficial comparada con el agua lluvia (Burgis & Morris, 1987)

Parámetros químicos mg L <sup>-1</sup>	Cuenca de rocas ígneas (insolubles) con bosques no intervenidos New Hampshire (EE.UU.)		Cuenca de rocas calizas con agricultura en las partes bajas. Norfolk (R.U.)		Cuenca de matorrales espinosos y ganadería. Rift Valley (Kenia)	
	Agua lluvia	Río	Agua lluvia	Río	Agua lluvia	Río Malewa
	$Na^+$	0,12	0,87	1,2	32,5	0,54
$K^+$	0,07	0,23	0,74	3,1	0,31	4,3
$Mg^{2+}$	0,04	0,38	0,21	6,9	0,23	3,0
$Ca^{2+}$	0,16	1,65	3,7	100,0	0,19	8,0
$Cl^-$	0,47	0,55	<1,0	47,0	0,41	4,3
$HCO_3^-$	0,006	0,92	0	288,0	1,2	70,0
$SO_4^{2-}$					0,72	6,2
pH	4,14	4,92	3,5	7,7		

**Tabla 3**

Ejemplo de los cambios en las concentraciones iónicas ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ ) en diferentes muestras de agua (Farrell & Boyle, 1991).

	pH	$\text{NH}_4^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$
Agua lluvia	5,50	0,028	0,019	0,24	0,048
Agua después de pasar por la vegetación	5,17	0,083	0,077	0,80	0,15
Agua en el humus	3,87	0,14	0,20	0,93	0,15
Agua en el suelo a 25 cm	4,15	0,003	0,077	1,10	0,17
Agua en el suelo a 75 cm	4,50	0,0043	0,087	0,92	0,16

mita la pérdida de nutrientes hacia los sistemas lóticos. De hecho, los ríos y quebradas en la selva húmeda son sistemas muy diluidos y la mayoría de los iones son liberados de manera lenta (Moss, 1998).

### Geología, suelos y pH

Lo anteriormente dicho muestra el papel que cumplen los suelos, la vegetación y otros factores en los cambios de la naturaleza química de la precipitación antes de que ésta entre en los sistemas lóticos. Cada tipo de suelo tiene diferentes efectos en el agua, especialmente en lo que respecta a su capacidad de neutralizar y amortiguar la acidez del agua de precipitación, así como la que ha pasado ya por la vegetación e incluso la que está en el suelo mismo. Esto está relacionado con la naturaleza del material parental.

Los iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ), producidos por la disociación del ácido carbónico presente en el agua lluvia, son la causa de la acidez y son neutralizados por la solución de minerales carbonatados y la hidrólisis de minerales de silicato, en la medida en que ésta percola a través de rocas y suelos. Esto significa que la capacidad *buffer* de las rocas está dada por los niveles de carbonatos y bicarbonatos de calcio, así como por la de silicatos solubles. El tiempo de residencia del agua en el suelo también influye en la tasa y cantidad de este efecto *buffer*. Así, esta agua neutralizada y amortiguada llega a los ríos y quebradas cargando estas sustancias, que han sido liberadas directamente desde el material parental que conforma sus cauces.

Las cuencas que se encuentran en rocas ígneas duras tienden a tener bajos contenidos de sales disueltas, por lo que poseen una baja capacidad *buffer* y las aguas superficiales son blandas y ácidas, con valores de pH entre 3,5 y 5,5. Por otro lado, las cuencas que se

encuentran sobre rocas sedimentarias, especialmente calcáreas, presentan aguas superficiales duras, con alta capacidad *buffer* y pH alto entre 7,5 y 8,5. Igualmente, aquellos suelos con carbonatos libres, altos contenidos de silicatos solubles o alta saturación de bases producen por lo general aguas con buena capacidad *buffer* y aguas de carácter neutro. Por el contrario, en cuencas con suelos fuertemente lavados y muy baja capacidad *buffer* se producen los llamados ríos de “aguas negras”, característicos de zonas selváticas. Los sistemas de aguas dulces que se encuentran en cuencas con materiales parentales y suelos de baja capacidad *buffer* son muy vulnerables al impacto de la lluvia ácida, causada por la contaminación atmosférica, en tanto que la cobertura vegetal está compuesta por bosques de coníferas.

### Uso del suelo, nutrientes y contaminación

Si bien el espray marino y el lavado de las rocas dominan la composición iónica de la mayoría de las aguas dulces del mundo, las actividades humanas, a través de la agricultura, la industria y la contaminación urbana, son probablemente las de mayor efecto en los niveles de nutrientes presentes en ellas. Los nutrientes pueden ser factores limitantes importantes en el crecimiento de las plantas y en la productividad en hábitats acuáticos, así como lo son también en los terrestres. El agua lluvia tiene pequeñas cantidades de compuestos nitrogenados disueltos, provenientes de la atmósfera (ácido nítrico y amoníaco), pero aun así, ésta puede ser una importante fuente, o incluso el elemento clave, en sistemas de agua dulce en zonas desérticas (Giller & Malmqvist, 2006). En climas húmedos, en la medida en que el agua lluvia percola a través de la vegetación y el suelo, la concentración se incrementa y el nitrógeno, principalmente como nitrato, llega hasta los cursos de agua. La concentración

de nitratos varía también con la extensión de las tierras cultivadas dentro de la cuenca, pudiendo dar como resultado que grandes flujos de nitrógeno total (de 876 a 5000 kg m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>) puedan llegar a las corrientes de agua por escorrentía desde las zonas agrícolas (Billen et al., 1995), generando procesos de eutrofización del agua. La producción animal intensiva contribuye también a elevar los niveles de nitrógeno en la cuenca.

El fósforo (P) es lavado de rocas y suelos en pequeñas cantidades. Debido a su escasez natural en la biosfera y a la habilidad de las plantas para absorber y retener el P, éste se encuentra por lo general en bajas concentraciones, principalmente en forma de fosfatos, en las aguas superficiales. Sin embargo, en áreas agrícolas sus valores pueden ser altos (10 a 150 µ L<sup>-1</sup>). En países desarrollados, cerca de la mitad del P presente en las partes medias y altas de los ríos proviene de los detergentes desechados con las aguas servidas. La cantidad de fertilizantes utilizados en agricultura se ha incrementado en la mayoría de los países durante los últimos cien años y la mayoría de éstos se pierde hacia las aguas superficiales. En países europeos se estima que hasta una tercera parte de los fertilizantes aplicados terminan en los cursos de agua (Tunney et al., 1996). Los valores del pH tienden también a incrementarse con el aumento de la actividad agrícola, en parte debido a la práctica de encalar los suelos. Esta práctica puede cambiar la acidez natural de éstos y producir suelos con capacidad *buffer* moderada a alta, efecto que puede perdurar entre 60 y 100 años.

Los pesticidas usados en agricultura y cultivos forestales no son muy solubles, pero pueden encontrarse en bajas concentraciones en las aguas de drenaje; aun así, por los efectos de la biomagnificación, pueden alcanzar niveles importantes en altos predadores acuáticos. La contaminación industrial introduce nuevas sustancias en las corrientes de agua e incrementa también las naturales. Obviamente, la concentración y los niveles de toxicidad varían según el volumen de las descargas. El impacto de los efluentes de procesos mineros puede ser grave.

La contaminación atmosférica puede afectar los hábitats dulceacuícolas lejanos a la fuente de contaminación. Un ejemplo de esto es la lluvia ácida. El impacto depende de la capacidad *buffer* de los suelos y del tipo de cobertura vegetal, presentes en la cuenca receptora. Sin embargo, una exposición excesiva durante periodos

largos de tiempo a la contaminación por lluvia ácida puede agotar la capacidad *buffer* de los bicarbonatos y producir una disminución de los valores de pH, tal como se ha documentado en Escandinavia, Canadá, el norte de Estados Unidos, al igual que en Escocia y Gales en el Reino Unido.

### Materia orgánica y sólidos suspendidos

La materia orgánica particulada llega a las corrientes de agua en forma de ramas, hojas, flores, frutos, polen, etc., provenientes de la vegetación circundante, y como humus finamente dividido y desechos animales a través de la erosión de sus orillas. Los sólidos suspendidos inorgánicos provienen de fuentes terrestres, como los suelos, y transportados a las corrientes de agua por lluvias fuertes y erosión de las orillas. Los sólidos suspendidos están relacionados directamente con los niveles de luz subsuperficial e indirectamente con la naturaleza del sustrato. La cantidad de sólidos suspendidos puede variar ampliamente; como ejemplo, en ríos del norte de Suramérica se han medido valores comprendidos entre 5 y 540 mg L<sup>-1</sup> (Lewis et al., 2006). La naturaleza de los materiales suspendidos (y disueltos) afectan las propiedades ópticas del agua, lo cual se usa para clasificar los ríos (Sioli, 1975):

- Ríos de *aguas negras*. Pobres en sólidos inorgánicos disueltos y suspendidos, la materia orgánica disuelta les confiere un color café - rojizo. Estos ríos tienen valores bajos de pH.
- Ríos de *aguas blancas*. Tienen altos niveles de sólidos suspendidos y una apariencia lodosa. Ya que también poseen altos niveles de sólidos inorgánicos disueltos, tienden a ser alcalinos.
- Ríos de *aguas claras*. De acidez variable y poco material suspendido.

Además de los suelos altamente erosionables, las malas prácticas de conservación de suelos (asociadas en especial a la agricultura) pueden provocar niveles extremadamente altos de sedimentos en las corrientes de agua. La deforestación de la cuenca, así como el sobrepastoreo en las partes altas (sobre todo con ovejas y cabras), puede ocasionar una erosión del suelo a gran escala y un aporte importantes de sedimentos a los cursos de agua. Otra actividad antrópica que tiene

un efecto notable en la carga de sólidos suspendidos en las corrientes de agua es la construcción de represas, las cuales reducen el transporte de sedimentos aguas abajo, lo que influye en la fertilidad de las tierras bajas de la cuenca e incluso la de ecosistemas marinos, como es el caso de la represa de Aswan en el río Nilo.

### Variación de la química del agua en el tiempo

Si se hace un monitoreo periódico de la química del agua en una misma estación de muestreo de un curso de agua, se detectan patrones de variación. En cursos de agua con altas densidades de macrofitas, la fotosíntesis puede causar variaciones en los valores del pH desde 7,4 en la noche hasta 9,0 en el día, así como en los niveles del oxígeno disuelto. También pueden producirse cambios reversibles a corto plazo, con el incremento y disminución del caudal por aumento de la precipitación, o a largo plazo, por cambios del régimen climático.

El caudal normal (flujo base) de los cursos de agua presenta generalmente mayores concentraciones de la mayoría de los iones durante las crecientes. El caudal crece de manera rápida hasta un máximo, dos o tres horas después de una lluvia fuerte, por lo que muchas de estas aguas han tenido sólo un mínimo tiempo de contacto con los suelos y rocas de la cuenca. Sin embargo, durante estas crecidas la concentración de iones  $H^+$  se incrementan y los valores del pH disminuyen. Esto se conoce como pulsación ácida. En cuencas boscosas con geología de baja capacidad *buffer*, la disminución del pH puede ser aún mayor y estar acompañada por un incremento de la concentración de aluminio. Por lo regular, durante estas crecidas la conductividad disminuye. Dichos eventos episódicos pueden tener un marcado efecto sobre la biota, especialmente por la acidificación del agua. Los niveles de sólidos suspendidos aumentan durante las crecientes, en particular en aquellos cursos de agua con poca vegetación riparia. Si después de lluvias fuertes sigue un periodo de sequía, los solutos acumulados en el agua del suelo incrementan su concentración por evaporación, generando procesos de mineralización y nitrificación. Así, el agua de escorrentía después de un periodo de sequía contiene grandes cantidades de nitratos y otros solutos (Hornung & Reynolds, 1995).

Los cambios a largo plazo en la química del agua están directamente relacionados con el uso de los suelos en la cuenca (deforestación, contaminación por malas prácticas agrícolas, etc.). Estos cambios no son reversibles, a menos que se detenga la contaminación y se recupere la vegetación original de la cuenca.

### Variación de la química del agua en el espacio

Las variaciones en la química del agua a pequeña escala en sectores de los cursos de agua no son fáciles de detectar debido a la mezcla que se produce en las aguas corrientes. Sin embargo, las altas tasas respiratorias y de mineralización del nitrógeno que se dan en la zona hiporreica producen un aumento en los niveles de nitrógeno y reducción de oxígeno en algunas zonas del curso de agua, lo cual influye en la distribución de las algas béticas.

Las variaciones a una mayor escala dentro del río son un fenómeno bien conocido. Como regla general, la concentración de la mayoría de las sales disueltas (conductividad, alcalinidad y dureza), los niveles de nutrientes, así como los valores de pH, tienden a incrementarse del nacimiento a la desembocadura. A veces estos cambios pueden ser repentinos debido a la confluencia con un tributario o a la entrada de aguas subterráneas con características químicas muy diferentes, pero generalmente estos cambios se producen de manera continua, por la adición gradual de sales desde los tributarios que conforman la red hidrológica de la cuenca. Los cambios en la geología, los suelos, el clima, la vegetación, así como las actividades antrópicas, que se dan desde las cabeceras hasta las partes bajas de la cuenca, influyen también en las variaciones químicas del agua de ríos y quebradas.

A escala regional, la geología y los suelos son el principal factor que influye en las características químicas del agua, así como el clima local (especialmente los patrones de lluvia) y la vegetación. A escala geográfica, la geología y el clima son también los factores claves. En Suramérica, con extensos bosques de lluvia y altas precipitaciones anuales, el promedio de sólidos disueltos totales es el más bajo del mundo. En África este promedio es también bajo pero por factores distintos: una geología de rocas duras y suelos altamente lavados. Los ríos europeos tienen las mayores concentraciones de diferentes parámetros, debido a la agricultura intensiva y extensas áreas urbanas e industriales.

## Relaciones entre la química del agua y la biota

A causa de que en pequeña escala espacial no se presentan variaciones en la química del agua, es difícil explicar los patrones de distribución de plantas y animales en pequeños sectores de los ríos y quebradas con base en la química del agua. Sin embargo, a una escala regional, entre cuencas, se pueden detectar patrones claros que pueden relacionarse con variaciones en la química del agua, particularmente con el pH y otras variables referentes a éste.

Una de las principales aproximaciones al estudio de los patrones de distribución de las comunidades de ríos y quebradas se ha basado esencialmente en la correlación de la distribución de las especies con uno o más factores ambientales que varían de uno a otro curso de agua. Las muestras tomadas en una serie de sitios de muestreo pueden clasificarse o proyectarse en ejes de variación (ordinación), relacionándolas con la composición y abundancia de las especies a través de técnicas de análisis multivariado, y los patrones resultantes pueden ser, a su vez, comparados con gradientes de factores ambientales. En áreas donde se han hecho muestreos de las comunidades de macroinvertebrados bénticos en una variedad de sitios con rangos bajos de acidez ( $\text{pH} < 4-6$ ), siempre muestran que el pH u otros factores químicos relacionados, como la alcalinidad, la dureza o la concentración de aluminio, son los que permiten clasificar o separar los sitios de muestreo. Otras características, como la distancia del nacimiento, el orden del curso de agua, el caudal y la pendiente, desempeñan un papel secundario.

## Uso, abuso y conservación de ríos y quebradas

Los ríos y quebradas de todo el mundo han soportado el crecimiento de la civilización humana desde la aparición de las primeras ciudades, hace cerca de 7000 años (Meybeck, 1996), pero el resultado de este crecimiento y de la diversificación de las actividades humanas ha sido el deterioro de la mayoría de los ríos y quebradas del planeta. Ya hace más de tres décadas algunos científicos (Hynes, 1970) llamaban la atención sobre cómo las actividades humanas estaban afectando los ríos y quebradas del mundo, al extremo de que en dicha época ya era difícil encontrar alguna quebrada o ríos que no hubieran sido afectados. Esta situación no ha cambiado e incluso ha empeorado en muchas partes del mundo.

Lo que sí ha mejorado es nuestro entendimiento de los cambios que hemos provocado sobre estos ecosistemas, los factores que los han causado y, en menor medida, cómo prevenir futuros impactos y cómo rehabilitar estos ecosistemas que hemos dañado.

Los efectos más dramáticos que hemos ocasionado sobre estos ecosistemas involucran cambios continuos y directos sobre la química del agua, a través de su eutrofización y acidificación, alteraciones a largo plazo de la morfología de ríos y quebradas y de sus hábitats por medio de la regulación y canalización de su flujo, disminución de los niveles de las aguas freáticas, destrucción de sus zonas riparias e introducción de especies exóticas. Estos efectos se producen en algunos tributarios de las cuencas o incluso en cuencas enteras, como es el caso de nuestros ríos Bogotá y Magdalena, por nombrar sólo algunos casos. La contaminación accidental o intencional de las aguas de ríos y quebradas también se ha incrementado, en la medida en que éstos se han vuelto más importantes como receptáculos de los efluentes industriales y domésticos.

Sabemos que las aguas corrientes, si la contaminación no es muy grave, tienen una alta resistencia a los cambios e incluso una alta capacidad de autodepuración con el tiempo o con la distancia desde su nacimiento. Sin embargo, una entrada de contaminantes de manera extensiva, concentrada o continua, puede acabar con esta capacidad innata de tales ecosistemas. Hoy en día sabemos también que los organismos acuáticos pueden emplearse como “barómetros” de medición de estos cambios (por ejemplo, usando índices de biodiversidad o sistemas como el BMWP: Biological Monitoring Working Party, y que estos organismos son testigos de los impactos que causan los contaminantes, ya sean físicos o químicos. ¡Aún no se ha perdido todo!

## BIOLOGÍA DE RÍOS Y QUEBRADAS

Los principales factores que gobiernan la vida en los sistemas lóticos se refieren al flujo del agua y a su química (incluyendo el oxígeno disuelto). De todas maneras, para comprender las comunidades lóticas es necesario acercarse a ellas desde un punto de vista integral, por lo que es necesario tener en cuenta la influencia de los cambios ambientales en materia de variaciones en tiempo y espacio, como características claves para comprender estas aguas en movimiento.

La acción de tales variaciones (tiempo y espacio) en los factores ambientales lleva al establecimiento de hábitats lóticos, teniendo como resultado un ambiente que establece unas condiciones abióticas determinadas, presionando así a que los organismos lóticos tengan que adaptarse para poder sobrevivir. Desde este fundamento evolutivo, en un próximo artículo se podrán explorar los tipos de plantas y animales lóticos, al igual que considerar sus adaptaciones. Más adelante se podrán examinar los procesos de flujo de energía, ciclaje de nutrientes, descomposición, interacciones entre especies, estructura de la comunidad, diversidad de especies y distribución de éstas.

### CONSERVACIÓN DE RÍOS Y QUEBRADAS

Es clave reconocer los factores que influyen la conservación tanto de la biodiversidad como de los hábitats de agua lóticos. Al hacerlo, aumentamos nuestra capacidad de manejarlos de manera exitosa e, incluso, lograr rehabilitarlos. Así, se consigue mantener y mejorar los servicios ambientales que ellos prestan, ya que en éstos fluye la preciada agua dulce superficial que requerimos para nuestra supervivencia. Ésta interactúa a su paso con todo tipo de ecosistemas terrestres y algunos de los acuáticos. Al estudiar dichos hábitats, encontramos que todos presentan una serie de elementos en común, todos llevan agua dulce superficial hacia abajo, es decir, convergen; al mismo tiempo divergen, esto es, que se encuentra que cada río es único, ya que cada uno presenta condiciones fisicoquímicas especiales, así como una cierta abundancia relativa de especies (Cummins et al., 1984, p. 13).

Desde el año 1968, en Boston, en el simposio titulado “The stream ecosystem”, se lanzó la propuesta de un modelo para ayudar a la comprensión de ríos y quebradas, denominado “El concepto de los ríos continuos”. Este modelo aplica a cuerpos de agua intactos, se enfoca en las características geomorfológicas e hidrológicas del ecosistema, tiene en cuenta las variaciones estacionales y espaciales, relacionadas con el suplemento de materia orgánica al sistema, es decir, que encuentra sus fuentes a lo largo del drenaje; todas estas consideraciones hacen que se tenga como resultado el que se determine la estructura de la comunidad de los invertebrados en cada parte del sistema lótico, aquellas que se hayan adaptado a esas condiciones en especial.

Para estudiar una quebrada o río en particular, se pueden establecer generalizaciones y predicciones, hasta llegar a identificar los procesos que lo gobiernan, precisamente desde su variabilidad.

### BIBLIOGRAFÍA

- Allan, J.D. (1995), *Stream ecology, structure and functions of running waters*. London: Chapman and Hall.
- Armitage, P.D., Moss, D., Wright J.F. & Fruse, M.T. (1983). The Performance of a New Biological Water Quality Score System Based on Macroinvertebrates over a Wide Range of Unpollution Running – water sites. *Water Research*, N.º 17, pp. 333-347.
- Berner, E.K. & Berner, R.A. (1987). *The global water cycle*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice - Hall.
- Billen, G., Décamps, H., Garnier, J., Boët, P., Meybeck, M. & Servais, P. (1995). Atlantic River Systems of Europe (France, Belgium, The Netherlands). In *Ecosystems of the World 22. River and stream ecosystems* (C.E. Cushing, K.W. Cummins and G.W. Minshall, eds.), pp. 389-418. Elsevier, Amsterdam.
- Bisson, P.A. & Sedell, J.R. (1984). Salmonid populations in streams in clearcut vs. old-growth forests of western Washington. In *Fish and wildlife relationships in old growth forests*. Proceedings of a symposium (W. Meehan, T. Merrell and T. Biswas, S.P., eds.) (1996). Global water scarcity: issues and implications with special reference to India. *International Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*, 26, 115-121.
- Burgis, M.J. & Morris, P. (1987). *The natural history of lakes*. Cambridge University Press.
- Carpenter, K. E. (1928). *Life in Inland Waters*. London: Sidgwick and Jackson, p. 267.
- Chesters, J.F. (1980). Biological Monitoring Working Party. The 1978 national testing exercise. Department of Environment. Water Data Unit. *Technical Memorandum*, N.º 19: 1-37.
- Cushing, C.E., Cummins, K.W. & Minshall, G.W. (2006). *River and Stream - Ecosystems of the World*. University of California Press.
- Farrell, E.P. & Boyle, G.M. (1991). *Monitoring a forest ecosystem in a region of low level anthropogenic emissions: Ballyhooley Project*. Final Report, EC Programme on the Protection of the Community's Forests Against Atmospheric Pollution (Project N.º 8860IR001). Brussels.
- Gee, A.S. & Stoner, J.H. (1989). A review of the causes and effects of acidification and surface waters in Wales and potential mitigation techniques. *Archives Environmental Contamination and Toxicology*, 18, 121-30.
- Giller, P.S. & Malmqvist, B. (2006). *The biology of streams and rivers*. Oxford University Press.
- Hornung, M. & Reynolds, B. (1995). The effects of natural and anthropogenic environmental changes on ecosystem processes at the catchment scale. *Trends in Ecology and Evolution*, 10, 443-449.
- Hynes, H.B.N. (1970). *The ecology of running waters*. Liverpool University Press.
- Ideam (2010). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá.
- Ideam (2006). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá*. Bogotá.
- Keller, R. (1984). The world's fresh water: yesterday, today, tomorrow. *Applied Geography and Development*, 24, 7-23.
- Leopold, L.B. (1962). Rivers. *American Scientist*, 511-537.
- Lewis Jr., W.M., Hamilton, S.K. & Saunders III, J.F. (1995). Rivers of northern South America. In *Ecosystems of the world 22. River*



- and stream ecosystems (C.E. Cushing, K.W. Cummins and G.W. Minshall, eds.), pp. 219-56. Elsevier, Amsterdam.
- Lewis (2006).
- Liévano, A. & Ospina, R. (2007). *Guía ilustrada de los macroinvertebrados acuáticos del río Bahamón*. Universidad El Bosque e Instituto Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C., Colombia.
- Milliman, J.D. & Meade, R.H. (1983). World-wide delivery of river sediment to the oceans. *Journal of Geology*, 91, 1-21.
- Milliman, J.D. (1990). Fluvial sediment in coastal seas: flux and fate. *Nature Resources*, 26, 2-22.
- Moss, B. (1998). *Ecology of fresh waters* (3rd ed.). Oxford: Blackwell Science.
- Riss, W., Ospina, R. & Gutiérrez, J. (2002). Establecimiento de valores de bioindicación para macroinvertebrados acuáticos de la sabana de Bogotá. *Caldasia* 24: 135-156.
- Shelford, V.E. (1914). An experimental study of the behavior agreement among animals of an animal community. *Biol. Bull.*, 26: 294-315.
- Shelford, V.E. & Eddy, S. (1929). Methods for the study of stream communities. *Ecology*, 10: 382-392.
- Sioli, H. (1975). Tropical river: the Amazon. In *River ecology* (B.A. Whitton, ed.), pp. 461-488. Berkeley: University of California Press.
- Smock, L.E., Gladden, J.E., Riekenburg, J.L., Smith, L.C. & Black, C.R. (1992). Lotic macroinvertebrate production in three dimensions: channel surface, hyporheic and floodplain environments. *Ecology*, 73, 876-886.
- Thienemann, A. (2006). Der Berbach des Sauerland. In Cushing, C.E., Cummins, K.W. & Minshall, G.W. *River and Stream Ecosystems of the World*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Thienemann, A. (2006). Die Binnengewässer Mitteleuropas. In Cushing, C.E., Cummins, K.W. & Minshall, G.W. *River and Stream Ecosystems of the World*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Thorp, J.H. & Covich, A.P. (1991). *Ecology and classification of North American freshwater invertebrates*. San Diego: Academic Press.
- Tunney, H., Carlton, O.T. & Megette, W.L. (1996). Trends in phosphorus fertiliser use, soil reserves, animal manures and management strategies to reduce loss to water. In *Disturbance and recovery of ecological systems* (S. Giller and A.A. Myers, eds.), pp. 155-162. Dublin: Royal Irish Academy.
- Wassenberg – Lund (1943).
- Ward, J.V. (1992a). *Aquatic insect ecology*. 1. Biology and habitat. New York: Wiley.
- Wetzel, R. (1983). *Lymnology*, (2nd ed.). New York: Saunders.

# Alternativas de solución al problema probabilístico en los puntos de convergencia de una red PERT

## Alternative solutions to the probabilistic problem on the convergence points of a PERT network

**GERMÁN EDUARDO GIRALDO GONZÁLEZ**

Ingeniero industrial, M.Sc., PMP. Profesor de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Unidad de Proyectos.

german.giraldo@escuelaing.edu.co

Recibido: 01/03/2014 Aceptado: 15/03/2014

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

### Resumen

Los autores del PERT (1958) y otros (como Malcolm et al., 1959) han adoptado los parámetros de la distribución beta para representar la duración de las actividades basándose en suposiciones de ajuste a la realidad, lo cual se ha aceptado debido principalmente a la “flexibilidad” de la distribución (Moder et al., 1967). Sin embargo, la adopción de estos parámetros (media y varianza) ha sido criticada por autores como Perry & Greig (1975), Moder & Rodgers (1968), y MacCrimmon & Ryavec (1962 y 1964), debido a la falta de exactitud, sobre todo cuando se analizan redes en las que las actividades presentan varios precedentes. En este estudio se revisa el problema probabilístico que se presenta al calcular la media y la varianza en redes PERT, y se referencian algunas de las soluciones más importantes y nombradas en la bibliografía.

**Palabras claves:** gerencia de proyectos, redes, PERT, media, varianza.

### Abstract

The authors of PERT (1958) and others (e.g. Malcolm et al., 1959) have adopted the parameters of the beta distribution to represent the activities' duration based on assumptions of adjustment to reality, which has been accepted mainly due to the “flexibility” of the distribution (Moder et al., 1967). However, the adoption of these parameters (mean and variance) has been criticized by authors such as Perry & Greig (1975), Moder & Rodgers (1968) and MacCrimmon & Ryavec (1962 and 1964), due to the lack of accuracy, especially when analyzing networks wherein activities have several precedents. This study reviews the probabilistic problem called “merge bias” that is presented to calculate the mean and variance under the system in PERT networks, and presents some key references to some important and frequently named solutions found in literature.

**Keywords:** project management, networks, PERT, mean, variance.

## INTRODUCCIÓN

La Técnica de Revisión y Evaluación de Proyectos (*Project Evaluation and Review Technique*, PERT), es una metodología creada en el año 1958 por la Oficina de Proyectos Especiales de la Marina de Guerra del Departamento de Defensa de Estados Unidos, como parte del proyecto Polaris (desarrollo de misiles balísticos, lanzados desde submarinos). El método se utiliza principalmente para la planeación y evaluación de proyectos de cualquier tipo o tamaño, tomando como punto de partida los tiempos optimistas, pesimistas y más probables para cada una de las actividades que comprenden la red del proyecto. La duración o tiempo estimado para el completamiento de cada una de las actividades es una variable aleatoria, por lo que el método supone una distribución (beta) y los parámetros de ésta (media y varianza) para representar adecuadamente la duración de cada actividad.

Los parámetros de la distribución (media y varianza) son aproximados mediante fórmulas del PERT (que evitan resolver numéricamente una ecuación de tercer grado) en la siguiente forma:

$$\text{Media } (\mu) = \frac{a + 4m + b}{6} \quad (1)$$

$$\text{Varianza } (\sigma^2) = \left( \frac{b - a}{6} \right)^2 \quad (2)$$

A diferencia del sistema PERT, el método de la ruta o trayectoria crítica (CPM, *Critical Path Method*) trabaja con tiempos determinísticos, mientras que el PERT lo hace con tiempos probabilísticos.

En sus orígenes, una malla o red PERT se representa típicamente mediante una red con actividad en el arco (AoA, *Activity on Arc*), pero en la actualidad la representación que se usa más comúnmente es la de red con actividad en el nodo (AoN, *Activity on Node*). En una red AoN, cada uno de los nodos contiene la siguiente información:

- Actividad (nombre).
- Duración esperada de la actividad (unidades de tiempo).
- Tiempo de inicio más temprano (ES: *Earliest Start*).

- Tiempo de término más temprano (EF: *Earliest Finish*).
- Tiempo de inicio más tardío (LS: *Latest Start*).
- Tiempo de término más tardío (LF: *Latest Finish*).
- Holgura de la actividad (H).

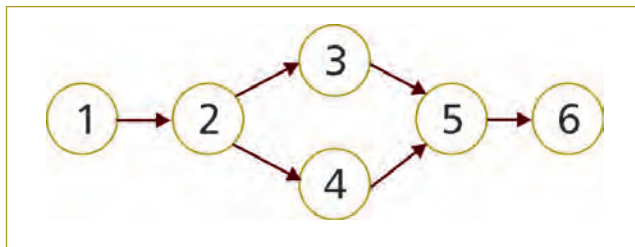
A continuación se observa una forma común de representación de un nodo en una red AoN.



**Figura 1.** Información contenida en los nodos de una red AoN.

## PROBLEMA PROBABILÍSTICO EN UN PUNTO DE CONVERGENCIA

Con el fin de establecer el problema que se presenta en los puntos de convergencia en las redes PERT, a continuación se da un ejemplo (figura 2).



**Figura 2.** Diagrama de red PERT N.º 1 (actividad en el arco).

Para ello se define:

$t_{ij}$  = duración de la actividad  $i-j$  (variable aleatoria).

$T_i$  = fecha de ocurrencia (inicio o finalización de la actividad) del evento  $i$  (variable aleatoria).

$E(x)$  = media (valor esperado).

$V(x)$  = varianza (valor esperado).

Se considera que la duración de una actividad cualquiera es independiente de la duración de cualquier otra. Entonces se puede establecer que el evento inicial de la red en la figura 1 tendría:

$$E(T_1) = 0 \text{ y } V(T_1) = 0 \quad (3)$$

Para los eventos 2 y 3, las fechas de los eventos, la media y la varianza son:

$$T_2 = T_1 + t_{1,2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} E(T_2) &= E(T_1) + E(t_{1,2}) \\ V(T_2) &= V(T_1) + V(t_{1,2}) \\ T_3 &= T_2 + t_{2,3} \\ E(T_3) &= E(T_2) + E(t_{2,3}) \\ V(T_3) &= V(T_2) + V(t_{2,3}) \end{aligned} \quad (5)$$

Existe un problema con respecto a la estimación de la media y la varianza esperadas en el sistema PERT y éste se presenta para el evento 4. Como la actividad 4-5 sólo puede comenzar una vez que han terminado todos sus predecesores (2-4 y 3-4), la fecha del evento 4 (variable aleatoria) según el sistema PERT se expresa de la siguiente manera para el ejemplo de la figura 1:

$$T_4 = \max \{ (T_2 + t_{2,4}), (T_3 + t_{3,4}) \} \quad (6)$$

En forma general:

$k$  = número de precedentes de un evento  $i$ .

Entonces, podemos decir que:

$$T_i = \max. \{ (T_1 + t_{1,i}), (T_2 + t_{2,i}), (T_3 + t_{3,i}), \dots, (T_k + t_{k,i}) \} \quad (7)$$

Para poder calcular el valor esperado de la media y la varianza de la duración de las actividades, el PERT asume que todo evento sigue una distribución normal:

$$E(T_4) = \max. \{ E(T_2 + t_{2,4}), E(T_3 + t_{3,4}) \} \quad (8)$$

$$V(T_4) = \begin{cases} V(T_2 + t_{2,4}) & \text{si } E(T_2 + t_{2,4}) > E(T_3 + t_{3,4}) \\ V(T_3 + t_{3,4}) & \text{si } E(T_3 + t_{3,4}) > E(T_2 + t_{2,4}) \end{cases} \quad (9)$$

Esta suposición no es cierta, tal como lo expresan Moder & Rodgers (1968), y McCrimmon & Ryavec

(1962 y 1964), entre otros autores. Dicha suposición puede hacerse únicamente si la fecha de un evento depende de una sola trayectoria, esto es, para la sumatoria de las duraciones de las actividades que tengan una sola precedencia cada una. Dicho de otra manera, si  $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$  son variables aleatorias distribuidas normalmente (como pueden serlo las fechas de  $n$  trayectorias precedentes de un evento), la distribución de  $y = \max. \{x_1, x_2, x_3 \dots x_n\}$  no es normal.

Entendemos que estimar la duración de cualquier actividad presenta cierta incertidumbre. Los autores del PERT ((1958) y otros (Malcolm et al., 1959) han adoptado los parámetros de la distribución beta (media y varianza) como representación de la duración de cualquier actividad, de modo que esta incertidumbre pueda representarse adecuadamente. Esto se ha aceptado, principalmente, a causa de la “flexibilidad” de la distribución (Moder & Phillips, 1970). Sin embargo, el uso de estos parámetros ha sido criticado por muchos autores, como Perry & Greig (1975), Moder & Rodgers (1968), y MacCrimmon & Ryavec (1962 y 1964), debido a la falta de exactitud en la estimación de las duraciones. La realidad es, que aunque la distribución de la duración de las actividades se ha especificado como beta, la distribución real de la duración es probablemente desconocida.

Entonces, es posible decir que PERT propone fórmulas para la aproximación de la media y la varianza de la distribución beta, las cuales pueden introducir errores en la duración total del proyecto (MacCrimmon & Ryavec, 1962 y 1964).

El procedimiento que utiliza PERT para calcular los parámetros de la distribución de la duración de la fecha de finalización del proyecto (valor de la media y la varianza de la duración de las actividades en el evento final) supone que estos tiempos se distribuyen normalmente. El problema con el método PERT convencional es que siempre conduce a una estimación optimista de la duración total de la red del proyecto. Este sesgo se debe a que en el PERT-CPM se ignoran todos los caminos subcríticos en los cálculos. McCrimmon & Ryavec (1962 y 1964) han estudiado este problema y son los factores más importantes que afectan el problema del “error en los puntos de convergencia” (en inglés *merge bias*), típicamente relacionado con el riesgo asociado a la unión de dos caminos, rutas o trayectorias. La corrección estadística de este problema se realiza mediante

la determinación del valor máximo de un conjunto de variables aleatorias que son, no necesariamente, estadísticamente independientes.

En resumen, el problema al cual nos enfrentamos es el del cálculo de la media y la varianza entre un conjunto finito de variables aleatorias.

El objetivo de este trabajo es identificar y describir los métodos y fórmulas más importantes y frecuentemente mencionados en la bibliografía para la corrección del problema probabilístico en las redes PERT para la estimación de la media y la varianza de la duración del proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA QUE PRESENTA SOLUCIONES AL PROBLEMA

Los autores del PERT (1958) presentan una solución analítica aproximada, que supone que si  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  son variables aleatorias con distribución normal, entonces  $y = \max. \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$  también tiene distribución normal. Los autores tratan de resolver el problema analíticamente mediante el almacenamiento de tablas que les permitan resolver las integrales que se presentan en los cálculos. Una representación de la solución se puede encontrar en el reporte final del PERT (1958, apéndice C). Las razones por las cuales esta solución no se adoptó pueden hallarse en el reporte (apéndice B).

La primera referencia que se encuentra en la bibliografía en referencia a las estimaciones optimistas del PERT se debe a Fulkerson (1962). El autor propone la estimación “f”, que permite la estimación en redes más grandes en menor tiempo y con mejores aproximaciones. Clark (1961, 1962) propuso una solución aproximada al problema, presentada por Moder & Phillips (1970) como un procedimiento de corrección. Ang et al. (1975) desarrolló la técnica *Probabilistic Network Evaluation Technique* (PNET), un método práctico y sencillo para evaluar las redes en condiciones de incertidumbre o predecir los tiempos (fechas) de finalización de los proyectos.

Chuen-Tao (1968) presenta una solución empleando métodos de Montecarlo. El autor propone usar generadores de números pseudoaleatorios para simular la duración del proyecto. El método utiliza, para generar la duración de cada actividad, la distribución de probabilidad más apropiada, el sistema CPM para determinar

la trayectoria crítica y repite el proceso un gran número de veces hasta encontrar el valor de la media y varianza de cada uno de los eventos. La simulación utiliza algunos generadores, como los de la distribución beta y gamma.

Perry & Greig (1975) proponen la estimación de la media y la varianza mediante el uso de los percentiles 5 y 95, los cuales ofrecen una solución más exacta que la propuesta por Clark (1961, 1962). Esta solución la propusieron inicialmente Moder & Rodgers (1968).

Kotiah & Wallace (1973) proponen emplear el método de máxima entropía para justificar el uso de una distribución normal truncada en el modelo, para luego comparar los resultados de las pruebas de ajuste obtenidos con el PERT original. Los resultados mostraron que, en todos los casos evaluados, la distribución beta registraba un mayor ajuste en la prueba, que la distribución normal truncada.

De igual manera, autores como McBride & McClelland (1967), Donaldson (1965), Grubbs (1962), Coon (1965) y McCrimmon & Ryavec (1964) han discutido diferentes propiedades para la distribución de tiempo de una actividad, entre las que se destacan unimodalidad, continuidad y dos interceptos no negativos.

McCrimmon & Ryavec (1964) proponen el uso de la distribución triangular además de la distribución beta, dado que los parámetros de la distribución triangular pueden calcularse con exactitud, lo que puede compararse con los resultados aproximados de la distribución beta.

Otros autores como Farnum & Stanton (1987), Pemachandra (2001) y Mohan et al. (2007) han propuesto modificaciones a las fórmulas originales del PERT basados en estimaciones de dos y tres puntos, moda y media, así como otras distribuciones. Los autores han logrado mejores aproximaciones a los parámetros reales.

Mohan et al. (2007) muestran que en los casos en los que es difícil hacer tres estimaciones es posible lograr una buena aproximación por medio de dos estimaciones (una optimista y otra pesimista) únicamente, mediante el uso de la distribución lognormal. El autor muestra, mediante experimentación, que la estimación de dos puntos puede ser mejor en ciertas condiciones.

Hahn (2008) y Herrerías-Velasco et al. (2011) proponen nuevas expresiones para la varianza basándose en el rango de duración de una actividad y manteniendo la expresión original de la media de los autores del PERT.

Buffa & Sarín (1987), Kerzner (1992, 2009), y Meredith & Mantel (1989, 2009), proponen un conjunto de “fórmulas PERT modificadas” para mejorar la estimación de la media y la varianza de los tiempos de las actividades. Keefer & Bodily (1983) desarrollan otras fórmulas para el cálculo de la media y la varianza modificando las propuestas por Pearson y Tukey (1965), y Swanson & Megill (1977), cuya aproximación se basa en una distribución robusta para la media desarrollada por los autores. Troutt (1989) muestra una modificación de las fórmulas PERT originales utilizando la moda en lugar de la media. Farnun & Stanton (1987), y otros autores como Pemachandra (2001), Mohan et al. (2007) y Golenko & Ginzburg (1988) han propuesto modificaciones a las fórmulas originales PERT basadas en dos y tres puntos, la moda y la media, los puntos extremos, así como otras distribuciones.

Keefer & Verdin (1993) hicieron comparaciones entre algunas de las aproximaciones más importantes para la media y la varianza en redes PERT. En este trabajo, las comparaciones de Buffa & Sarín (1987), Kerzner (1992, 2009), Meredith & Mantel (1989, 2009), la versión ampliada de Pearson & Tukey (1965), Swanson & Megill (1977), Troutt (1989), Farnun & Stanton (1987), y Golenko & Ginzburg (1988), se compararon contra la simulación de Montecarlo calculando el error y el porcentaje de error. Por último, esta simulación, especialmente el uso de los computadores en los cálculos, se ha acreditado a John von Neumann, Stanislaw Ulam y Nicholas Metropolis, mientras trabajaban en el proyecto Manhattan (Eckhardt, 1987, & Metrópolis, 1987).

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Muchos autores han tratado de corregir las fórmulas PERT para las aproximaciones de la media y la varianza de la duración de las actividades y presentado fórmulas de corrección para las aproximaciones de la media y la varianza de la duración de cada una de las actividades, tales como:

- Buffa & Sarin (1987), Kerzner (1992, 2009) y Meredith & Mantel (1989, 2009).
  - Keefer & Bodily (1983).
  - Pearson & Tukey (1965).
  - Swanson & Megill (1977).
  - Troutt (1989).
  - Farnun & Stanton (1987).
  - Golenko & Ginzburg (1988).
  - Keefer & Verdini (1993).
- Otros autores han propuesto varios métodos de corrección para la duración total del proyecto, pero algunos de los más representativos y mencionados en la bibliografía, son las soluciones que se encuentran en los documentos más antiguos, como se muestra a continuación:
- Clark (1961, 1962) y Moder & Phillips (1970).
  - Fulkerson (1962).
  - Ang et al. (1975). *Modified Network Evaluation Technique* (PNET).
  - Simulación Montecarlo (Eckhardt, 1987).
- Es necesario analizar y experimentar con este tipo de fórmulas y métodos de corrección, de modo que puedan desarrollarse nuevas alternativas de solución, que provean resultados más exactos. La combinación de las fórmulas (estimación de la duración de las actividades) con los métodos (estimación de la duración del proyecto) pueden generar métodos más cercanos a la realidad.

## REFERENCIAS

1. Alfredo H.S., Ang, Amal A., Chaker & Jamal, Abdelnour (1975). Analysis of Activity Networks under Uncertainty. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 101, N.º 4, July/August, pp. 373-387.
2. Buffa, E.S. & Sarin, R. K. (1987). *Modern Production/Operations Management*, 8th ed. New York: Wiley.
3. Chuen-Tao, Luis Y. (1968) *Aplicaciones prácticas del PERT y CPM*. Gestión Deusto.
4. Clark, Charles E. (1961). The Greatest of a Finite Set of Random Variables. *Operations Research*, 9, N.º 2. pp. 145-162.
5. Clark, Charles E. (1962). The PERT Model for the Distribution of an Activity Time. *Operations Research*, 10 (3), pp. 405-406.
6. Coon, H. (1965). Note on Donaldson's "The estimation of the mean and variance of a PERT activity time". *Operations Research*, 13, pp. 386-387.
7. Donaldson, N. (1965). The estimation of the mean and variance of a PERT activity time. *Operations Research*, 13, pp. 382-385.
8. Eckhardt, R. (1987). Stan Ulam, John von Neumann, and the Monte Carlo Method. *Los Alamos Science*. Special Issue (15), pp. 131-137.
9. Farnun, N. R. & Stanton, L. W. (1987). Some Results Concerning the Estimation of Beta Distribution Parameters in PERT. *Journal of Operational Research Society*, 38, pp. 287-290.
10. Farnun, N.R. & Stanton, L.W. (1987). Some results concerning the estimation of Beta distribution parameters in PERT. *Journal of Operations Research Society*, 38, pp. 287-290.

11. Golenko-Ginzburg, D. (1988). On the distribution of activity time in PERT. *Journal of Operations Research Society*, 39, pp. 767-771.
12. Grubbs, F. E. (1962). Attempts to validate certain PERT statistics or "picking on PERT". *Operations Research*, 10, pp. 912-915.
13. Hahn, E. D. (2008). Mixture densities for project management activity times: a robust approach to PERT. *European Journal of Operational Research*, 188, pp. 450-459.
14. Herrerias-Velasco, J. M., Herrerias-Pleguezuelo, R. & Van Dorp, J. R. (2011). Revisiting the PERT mean and variance. *European Journal of Operational Research*, 210, pp. 448-451.
15. Keefer D.L. & Bodily S.E. (1983). Three-Point approximations for continuous random variables. *Management Science*, 29, pp. 595-609.
16. Keefer D.L. & Verdini W.A. (1993, September). Better estimation of PERT activity time parameters. *Management Science*, vol. 39, N.º 9, pp. 1086-1091.
17. Keefer, D. L. (1993). Better Estimation of PERT Activity Time Parameters. *Management Science*, vol. 39, N.º 9, pp. 1086.
18. Kerzner, H. (1992). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling*, 4th ed. New York: Van Nostrand Reinhold.
19. Kerzner, H. (2009). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling and Controlling*, 10th ed. New York: International Institute for Learning, NY ISBN 978-0-470-27870-3.
20. Kotiah, T. C. T., & Wallace, N. D. (1973). Another Look at the PERT Assumptions. *Management Science*, 20, N.º 1, p. 44.
21. Kwak, Y.H. & Ingall, L. (2007). Exploring Monte Carlo simulation applications for project management. *Risk Management* 9, pp. 44-57.
22. Malcom, D. G., Roseboom, J. H., Clark, C. E. & Fazar, W. (1959). Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation. *Operations Research*, 7, N.º 5, pp. 646-669.
23. McBride, W. & McClelland, C. (1967). PERT and the Beta distribution. *IEEE Transactions on Engineering Management*, EM-14, N.º 4, pp. 166-169.
24. McCrimmon, K. R. & Ryavec, C. A. (1962 and 1964). An Analytical Study of the PERT Assumptions. *Operations Research*, 12, N.º 1, pp. 16-37.
25. Megill, R.E. (1977). *An introduction to risk analysis*. Tulsa, OK: Petroleum Publishing Company.
26. Meredith, J.R. & Mantel, S.J. Jr. (1989). *Project management: A managerial approach*, 2nd ed. New York: Wiley.
27. Meredith, J.R. & Mantel, S.J. Jr. (2009). *Project management: A managerial approach*, 7th ed. New York: Wiley. December 2008, ©2009. ISBN 978-0-470-22621-6.
28. Metropolis, N. (1987). The beginning of the Monte Carlo method. *Los Alamos Science* (Special Issue dedicated to Stanislaw Ulam), pp. 125-130.
29. Moder, Joseph J. & Phillips, Cecil R. (1970). *Project Management with CPM and PERT*, 2nd ed. Reinhold Publishing Corporation, 360 pp.
30. Moder, Joseph J. & Rodgers E. G. (1968). Judgment Estimates of the Moments of PERT type Distributions. *Management Science*, 15 N.º 2, pp. B76-83.
31. Mohan, S., Gopalakrishnan, M., Balasubramanian, H., & Chandrashekar, A. (2007). A lognormal approximation of activity duration in PERT using two time estimates. *Journal of the Operational Research Society*, 58, pp. 827-831.
32. Pearson, E.S. & Tukey J.W. (1965). Approximate means and standard deviations based on distances between percentage points of frequency curves. *Biometrika*, 52, pp. 533-546.
33. Perry, C. & Greig, I. D. (1975). Estimating the mean and variance of subjective distributions in PERT and decision. *Management Science*, 21, N.º 12, 1477 pp.
34. PERT, a dynamic project planning & control method. IBM Data Processing Application. E20-8067-1.
35. PERT, Summary Report - Phase 1 and 2 (1958). Special Projects Office Bureau of Naval Weapons. Department of the Navy.
36. Premachandra, I. M. (2001). An approximation of the activity duration distribution in PERT. *Computers & Operations Research*, 28, pp. 443-452.
37. Tattoni, S. & Schiraldi, M.M. (2008). Estimating project duration in uncertain environments: Monte Carlo Simulation strikes back. 22nd IPMA World Congress "Project Management to Run". 9-11 November 2008. Roma, Italy.
38. Tavares, L.V., Ferreira, J.A. & Coelho, J.S. (1999). The risk of delay of a project in terms of the morphology of its network. *European Journal of Operational Research*, 119, pp. 510-537.
39. Tavares, L.V., Ferreira, J.A. & Coelho, J.S. (2002). A comparative morphologic analysis of benchmark sets of project networks. *International Journal of Project Management*, 20, pp. 475-485.
40. Troutt, M.D. (1989). On the generality of PERT average time formula. *Decision Science*, 20, pp. 410-412.
41. Troutt, M. D. (1989). On the Generality of the PERT Average Time Formula. *Decision Sciences*, 20, N.º 2, p. 410.
42. Vanhoucke, M., Coelho, J.S., Debels, D., Maenhout, B. & Tavares, L.V. (2008). An evaluation of the adequacy of project network generators with systematically sampled networks. *European Journal of Operational Research*, 187, pp. 511-524.

# REVISTA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

## Alcance y política

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

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

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

También admite artículos de las siguientes tipologías:

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

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

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

## Requisitos para la publicación de artículos

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

## Scope and policy

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

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

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

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

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

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

## Ruling for publication

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





# Entregando lo mejor de los **colombianos**

Línea de atención al Cliente Nacional: 01 8000 111 210

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

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