



04
Octubre - diciembre de 2016

ISSN 0121-5132

P.V.P. Colombia \$12.000.00

Tarifa postal reducida N.º 2016-107 4-72
Servicios Postales Nacionales S.A.
Vence 31 de diciembre de 2016 - ISSN 0121-5132

- **Incidencia de las zonas de falla geológicas en los túneles en roca de Colombia.**
- **Estudio de seguridad vial para determinar la incidencia del diseño geométrico en la accidentalidad en la carretera Bogotá-Villavicencio, a partir de la salida del túnel de Boquerón a Puente Quetame.**
- **Elementos convencionales y no convencionales para la captación del drenaje urbano de aguas lluvias.**
- **Modelación hidrológica e hidráulica de la laguna de Fúquene y del río Suárez hasta las compuertas del Tolón.**
- **Cartilla de análisis de arcos metálicos en túneles y ábacos de diseño.**
- **Retroanálisis de las deformaciones obtenidas en estructuras de contención instrumentadas.**
- **Propuesta de diseño del plan de gestión de residuos peligrosos y no peligrosos para contratistas operativos del sector de hidrocarburos.**
- **Estudio de viabilidad técnica para la implementación de un puerto de transferencia intermodal en el municipio de Puerto Asís (Putumayo).**
- **Sistemas hidráulicos de protección contra incendios. Diseño, construcción, operación y mantenimiento.**



REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE

Ingeniería

104

CONSEJO DIRECTIVO DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

PRESIDENTE RICARDO RINCÓN HERNÁNDEZ

VOCALES MYRIAM ASTRID ANGARITA GÓMEZ
LUIS GUILLERMO AYCARDI BARRERO
ÁLVARO GONZÁLEZ FLÉTCHER
ARMANDO PALOMINO INFANTE
RICARDO QUINTANA SIGHINOLFI
HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ
JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS
GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS
JUAN MANUEL LUNA GORDILLO
(representante de los profesores)
VALENTINA VILLAMIZAR YÁÑEZ
(representante de los estudiantes)

RECTOR GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS

SECRETARIO RICARDO ALFREDO LÓPEZ CUALLA

REVISTA DE LA ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

DIRECTOR JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS

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

DIRECCIÓN EDITORIAL CRISTINA SALAZAR PERDOMO

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

DIRECCIÓN COMERCIAL EDITORIAL ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA

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

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

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

5 / EDITORIAL

Armando Palomino Infante

7-20

Incidencia de las zonas de falla geológicas en los túneles en roca de Colombia

Viviana Ramírez Arévalo

Con el fin de evaluar la incidencia de las zonas de falla en los túneles en roca de Colombia, se definieron conceptos de geología estructural que permitieran revisar los tipos de roca existentes, sus características, las clases de fallas y las deformaciones de la corteza terrestre.

21-32

Estudio de seguridad vial para determinar la incidencia del diseño geométrico en la accidentalidad en la carretera Bogotá-Villavicencio, a partir de la salida del túnel de Boquerón a Puente Quetame

Nancy Cifuentes Ospina

Los accidentes viales son uno de los mayores problemas en salud pública a escala internacional por las lesiones que ocasionan, lo que hace que sea prioridad identificar sus causas y tomar medidas para prevenirlos. Según estudios recientes, se ha establecido que los accidentes en las vías tienen que ver con factores como el usuario, el vehículo y la infraestructura.

33-38

Elementos convencionales y no convencionales para la captación del drenaje urbano de aguas lluvias

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz - Leidy Johanna Franco Calderón

El objetivo principal de un sistema de drenaje urbano es permitir el paso seguro de los peatones y los vehículos, la cual se logra evacuando la escorrentía con rapidez para evitar inundaciones; no obstante, el desarrollo de las ciudades ha modificado el ciclo hidrológico natural al aportar gran cantidad de contaminantes a las corrientes superficiales que reciben el agua lluvia del sistema urbano.

39-46

Modelación hidrológica e hidráulica de la laguna de Fúquene y del río Suárez hasta las compuertas de Tolón

Juan Carlos Páez Contreras

El comportamiento de los cuerpos de agua se ha vuelto un insumo de gran importancia para la realización y conservación de obras civiles, debido al desarrollo de centros poblados a su alrededor. Hay que tener en cuenta que su influencia puede afectar de manera importante cualquier obra si no se toman las precauciones necesarias y se les da el espacio que éstos requieren.

47-53

Cartilla de análisis de arcos metálicos en túneles y ábacos de diseño

Nicolás Andrés Castaño Miranda - José Vicente Amórtegui

El trabajo dirigido, denominado “Cartilla de análisis de arcos metálicos en túneles y ábacos de diseño”, consiste en el diseño de una herramienta con la cual, a través de la conjugación de variables evaluadas por medio de modelaciones con el *software* de

elementos finitos SAP 2000, se agilice el proceso de diseño de arcos metálicos en túneles y se constituya un método para el diseño de arcos metálicos intermedios entre un diseño empírico y uno de detalle, a partir de la implementación de programas de elementos finitos.

55-62

Retroanálisis de las deformaciones obtenidas en estructuras de contención instrumentadas

Édison Ferney Garzón Montaña

Los métodos empíricos para el diseño de excavaciones soportadas con pantallas se desarrollaron hace algunas décadas, pero no se han validado para los ambientes lacustres de la sabana de Bogotá. En este trabajo se hace un retroanálisis de las deformaciones obtenidas con inclinómetros y las calculadas con el programa Phase, además de que se comparan las presiones de tierras obtenidas con métodos clásicos y el análisis numérico.

63-68

Propuesta de diseño del plan de gestión de residuos sólidos peligrosos y no peligrosos para contratistas operativos del sector de hidrocarburos durante la etapa de explotación en el área de mantenimiento eléctrico, locativo y de tanques API que trabajan en el municipio de Aguazul (Casanare)

Wilman Giovanni Cucaita Pacheco

En este proyecto se hace un diagnóstico de la situación en cuanto al manejo de los residuos sólidos peligrosos y no peligrosos, al tiempo que se construye una matriz de aspectos e impactos ambientales, la cual determina que el diseño del plan de gestión de residuos es el control operacional que se debe implementar para minimizar los impactos que producen los residuos, y luego se clasifican los residuos por áreas para determinar las cantidades, características, almacenamiento, separación en la fuente y disposición.

69-81

Estudio de viabilidad técnica para la implementación de un puerto de transferencia intermodal en el municipio de Puerto Asís (Putumayo)

Miguel Horacio Robles Guerrero

La implementación de un nuevo puerto de carga sobre el río Putumayo, uno de los principales corredores fluviales del país, permitirá consolidar al municipio de Puerto Asís como un centro de transferencia de gran importancia internacional, con miras a estructurar un corredor intermodal bioceánico a través del corredor Tumaco-Mocoa-Puerto Asís-Belém do Pará.

83-88

Sistemas hidráulicos de protección contra incendios. Diseño, construcción, operación y mantenimiento

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz - Óscar Javier Ruiz Téllez

En este artículo se presenta un análisis sobre los inconvenientes que hay en Colombia para el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de los sistemas hidráulicos de protección contra incendios. Se estableció que en el país existe amplia información normativa sobre estos sistemas; sin embargo, aunque es una de las más completas de Suramérica, se evidencian fallas para su aplicabilidad en proyectos de ingeniería.

89 / ALCANCE Y POLÍTICAS

Editorial

ARMANDO PALOMINO INFANTE

Cofundador de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Miembro del Consejo Directivo.

armando.palomino@escuelaing.edu.co

Termina un año que ningún colombiano podrá olvidar. Por fin se han silenciado los fusiles de nuestras Fuerzas Militares y los de las FARC, que durante más de medio siglo generaron dolor a nuestro sufrido pueblo y a los soldados que pretendían contrarrestar los ataques con los que los guerrilleros buscaban debilitar a las Fuerzas Armadas en busca de la toma del poder, para lograr, según ellos, la mejora de la situación infeliz de los campesinos, causada por el abandono por parte del Estado.

No debemos olvidar que esta absurda guerra se originó por enfrentamientos entre los dirigentes de los partidos Liberal y Conservador, que se disputaban con violencia salvaje las riendas del Estado, conflicto que significó el surgimiento de los grupos subversivos en Colombia.

Como lo relata Francisco de Roux, haciendo referencia al acto que se llevó a cabo recientemente en la iglesia de San Francisco, en Cali, “la guerrilla reconoció la responsabilidad plena por el crimen de los quince diputados y, con ello, las obligaciones que esto implica. Pidió perdón a los familiares y a la sociedad del Valle.

Los familiares reclamaron la totalidad de la verdad y la responsabilidad del Estado. Los parientes expresaron con determinación su decisión de creer en el arrepentimiento de las FARC. Con una sinceridad valiente, salida del dolor, entregaron el perdón. Nadie calculaba que la paz sería tan difícil para las víctimas, que tienen en sus manos la reconciliación del país. Difícil para los victimarios de todos los lados, que han de aceptar responsabilidades con sus consecuencias”.

Los que no hemos resultado damnificados directamente estamos más que obligados a buscar el entendimiento, a aceptar que otros piensen distinto, a facilitar el regreso de los rebeldes sin odio alguno, a luchar para que se evite la persecución a los líderes sociales, con el fin de que jamás se repita un genocidio como del que fueron víctimas numerosos miembros de la Unión Patriótica.

Los actos de solidaridad como el que tuvo lugar en Colombia ante la tragedia de los deportistas brasileños deberían convertirse en nuestra actitud diaria. En ese orden de ideas, no deberíamos olvidar jamás las palabras de la periodista brasileña Claudia Jacques:

“Estoy feliz de saber que en el mundo existen personas como en Colombia.

Ustedes, el pueblo colombiano, son para el mundo hoy un gran ejemplo, un ejemplo de amor, paz y, sobre todo, de solidaridad. El mundo le hace reverencia a este país que abrazó una tragedia de otro pueblo como suya, en un mundo donde hoy cada persona piensa cada vez más en sí misma.

Ustedes probaron que lo que realmente importa son los seres humanos. Que Dios mire siempre a este país. Gracias”.

Por otra parte, en este mes la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito eligió a su nueva rectora: la ingeniera Myriam Angarita. Egresada de esta institución en 1980, cursó una maestría en Dirección Universitaria en la Universidad de los Andes. Trabajó como consultora y luego se vinculó a nuestra Escuela, donde ha desempeñado varios cargos directivos. Fue subdirectora

administrativa y financiera, coordinadora de Educación Continuada, directora del Programa de Ingeniería XXI, decana de Estudiantes, secretaria general y directora de la Unidad de Gestión Externa, donde lideró los programas Universidad-Empresa, Relaciones Internacionales y Educación Continuada. Creó la Oficina de Graduados de la Escuela y la Oficina de Convenios y Contratos, además de que participó en otros programas y procesos que han contribuido al desarrollo institucional. Ha representado a la Escuela en diversos espacios de los sectores productivo, estatal y de la educación superior.

La ingeniera Myriam Angarita reemplaza al ingeniero Germán Acero, quien desarrolló una labor tan importante que por primera vez en la historia de la Escuela los miembros del Claustro de Electores y los integrantes del Consejo Directivo le solicitaron que continuara en su cargo, para así poder llevar a feliz término el plan de desarrollo que él y su calificado equipo prepararon. Lamentablemente, por razones personales, el ingeniero Acero consideró que debía abandonar la misión que desempeñó con dedicación y tenacidad, para dedicarse de nuevo con la máxima intensidad a la investigación y docencia en el Laboratorio de Hidráulica. Estamos seguros de que su labor allí será también de la mayor trascendencia.

La nueva administración debe continuar con el empeño de minimizar la deserción, aportando la ayuda necesaria desde la docencia y la investigación para que el estudiante se esfuerce con pasión por lograr sus aspiraciones y se enamore cada vez más de su profesión, convencido de que con sus conocimientos y entusiasmo podrá ayudar a hacer más grande a Colombia, y con la confianza de que los tiempos que están por venir convertirán a nuestro pueblo en el más solidario, como lo expresó recientemente la periodista brasileña.

Teniendo en cuenta la situación que se vivirá en el país y lo que esto implicará para nuestros campesinos, y en general para los productores de todo tipo de alimentos y bienes, es indispensable facilitar al máximo su comercialización, buscando bajar los costos del transporte de los productos y que su retribución estimule su permanencia en el campo.

Para esto resulta obligatorio construir vías de comunicación que faciliten el transporte a los grandes centros de consumo, al igual que montar centros de acopio en las veredas y municipios regulados por el Estado, para evitar que tanto intermediarios como comercializadores

se sigan quedando con la mayor parte de las ganancias, en perjuicio de los productores.

Y es que la inversión hecha en la construcción de las grandes autopistas de cuatro carriles, apoyada por la Vicepresidencia de la República, beneficia principalmente a los propietarios de tractomulas. Es hora de replantear el destino de estas importantes inversiones y redirigirlo hacia el desarrollo de las vías terciarias y caminos veredales, hacia la adecuación de los transportes fluviales mediante el dragado de los ríos, como se estaba haciendo en el río Magdalena —proceso aparentemente detenido por el contrato con la empresa brasileña Odebrecht, envuelta en un sonado caso de corrupción en su país—, pues se sabe que el costo del transporte fluvial es muy bajo si se compara con el terrestre.

Así mismo, hay que recuperar las vías férreas existentes con los derechos de vías adquiridos hace muchos años. Para este fin sólo se requiere cambiar el ancho de la trocha e importar los equipos eléctricos, no contaminantes, de locomotoras y vagones, similares a los que existen hoy para el transporte del carbón en la Costa Atlántica, cuyos costos también son muy bajos comparados con los del transporte por carretera.

Es lamentable el caso del Ferrocarril del Atlántico, abandonado por el Estado a causa de presiones indebidas de los dueños del transporte de carga por carretera, los mismos que paralizaron el país en dos ocasiones recientes.

Los altos costos del transporte son la principal razón de la falta de competitividad internacional cuando pretendemos exportar. Además, el caos vehicular dentro de nuestras ciudades podría también aliviarse sin necesidad de ampliar autopistas, como es el caso de Bogotá; lo ideal sería ampliar las trochas para habilitar los corredores férreos e instalar trenes eléctricos desde Zipaquirá, Facatativá y Soacha, disminuyendo al mismo tiempo los niveles de contaminación ambiental. No hay que olvidar que cuando se amplía una vía estilo autopista, se deben comprar predios a precios inalcanzables. En los casos mencionados, ya hay trochas del Estado y sólo se requieren ampliaciones en las estaciones donde se cruzarían los trenes rápidos.

Todo lo anterior nos invita a replantear muchas de las prioridades del gasto en obras públicas y a asumir, como ciudadanos y como profesionales, los retos que nos plantea la construcción de un nuevo país.

Incidencia de las zonas de falla geológicas en los túneles en roca de Colombia

Incidence of geological fault zones inside road tunnels in rock in Colombia

VIVIANA RAMÍREZ ARÉVALO

Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

viviana.ramirez.a@hotmail.com

Recibido: 25/03/2016 Aceptado: 20/08/2016

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

Resumen

Con el fin de evaluar la incidencia de las zonas de falla en los túneles en roca de Colombia, se definieron conceptos de geología estructural que permitieran revisar los tipos de roca existentes, sus características, las clases de fallas y las deformaciones de la corteza terrestre. A continuación se estudió la geología colombiana, con miras a identificar los principales tipos de roca y formaciones geológicas, al igual que la gran variedad de tipos de rocas que hay en la geografía nacional. Luego se definieron los principales problemas geotécnicos asociados a las zonas de falla cuando existen túneles que cruzan por ellas, se revisó la bibliografía disponible acerca de las consideraciones en túneles para atravesar zonas de falla, se hallaron las principales técnicas de sostenimiento y métodos constructivos, y se hicieron algunas recomendaciones para cruzar dichas zonas.

Sin embargo, no se encontró una clasificación de fallas enfocada en el tema de excavación de túneles que permitiera estimar el soporte o el proceso constructivo más adecuado, de acuerdo con los problemas o procedimientos presentados. Se sabe que existen clasificaciones geotécnicas o geomecánicas dirigidas a calcular de manera empírica el soporte de una obra subterránea, como el RMR (Bieniaswky), Q (Barton) u otras, pero éstas son poco eficientes en la definición de procedimientos y elementos de sostenimiento a la hora de cruzar zonas de falla.

Posteriormente, se revisaron y evaluaron 53 casos de fallas geológicas atravesadas por túneles en Colombia en varios ámbitos geológicos y con diferentes espesores y coberturas. Con base en la información recopilada y analizada de estas fallas, se obtuvo una metodología empírica para la caracterización de zonas de fallas y se preparó una relación aproximada, también empírica que permite estimar las deformaciones

de convergencia a partir de un índice de falla y calificar así el grado de criticidad de las fallas. Con lo anterior, finalmente, se plantearon procedimientos para cruzar fallas, los cuales incluyen elementos de soporte, control y seguimiento. Dentro de este último aspecto se contempla la instrumentación geotécnica, que permite identificar y controlar las deformaciones y así tomar medidas preventivas durante la construcción cuando se presentan fallas geológicas que necesariamente tienen que ser cruzadas por túneles en las cordilleras del país.

Palabras claves: zona de falla geológica, deformación, túnel, excavación.

Abstract

To evaluate the incidence of geological fault zones in tunnels in rock in Colombia, firstly, it was important to review the structural geology concept that allows to define the types and characteristics of rocks, fault types and crustal deformations, and the main characteristics of the fault zones. Consequently, the Colombian geology was studied, identifying primarily the types of rocks and geological formation, noticing a huge variety of rocks in the country's geography. Once the geotechnical leading problems associated with zone failures were identified, the literature for crossing faults in tunnels considerations was examined. It was found that there are some supports systems techniques, building methods for tunnels, and a few crossing fault zones recommendations. However, there is not a fault classification focused on tunnel excavation or any building methods that enable the most appropriate supports system depending on the problems or mechanisms presented on the field. It is known that there are geotechnical or geomechanical

classifications aimed at estimating in an empirical way the supports system of underground constructions, e.g. RMR, Q, etc. But when it is related to the crossing faults methodologies, they are inefficient. In order to create an empirical methodology for fault characterization and strain estimation, 53 tunnel faults cases in Colombia were considered, studied and evaluated, in different geological environments with various land fault covers and fault thickness. Finally, mechanisms were proposed to cross fault zones, with different supports system, control, and tracing instruments that allow to identify and control strains and thus take preventive measures during construction when geological faults occur in the tunnel.

Keywords: geological fault zone; strain; tunnel; excavation.

INTRODUCCIÓN

Colombia es un país montañoso, por lo que sus macizos rocosos presentan estructuras o discontinuidades como la estratificación, diaclasas, plegamientos, zonas de falla, esfuerzos, presencia de agua, entre otras características, que hacen que su comportamiento varíe y se requiera un análisis específico y detallado.

Varios túneles en roca de Colombia tuvieron que atravesar zonas de falla en dichos macizos. Sin embargo, hoy no se cuenta, ni en Colombia ni a escala mundial, con una metodología específica (que contemple las condiciones del país) para cruzar dichas zonas de falla, lo que ha llevado a que en muchos casos se evite que el trazado del túnel pase por estas zonas. Se puede decir que existe un temor generalizado a trabajar en zonas de falla, debido a que se las asocia con problemas de sobrecostos y retrasos.

En este artículo se presenta una metodología empírica propuesta para clasificar zonas de fallas en túneles en roca, la cual permite estimar las deformaciones del túnel de acuerdo con el coeficiente de falla; éste dependerá del origen de la roca, resistencia de la roca intacta, cobertura, espesor de la falla, buzamiento, orientación respecto al túnel, RQD y caudal de infiltración de agua subterránea. En la metodología se incluyen también los mecanismos recomendados para cruzar fallas (sostenimiento e instrumentación), además de que se puede estimar la deformación máxima de convergencia como una primera aproximación. La metodología propuesta es aplicable para calificar las fallas geológicas desde un punto de vista ingenieril y permite brindar soluciones y métodos para cruzarlas.

INFORMACIÓN PRELIMINAR

Con el fin de identificar los tipos de estructuras geológicas presentes en el macizo rocoso y cuáles generan mayor influencia sobre el comportamiento de la roca, en primer lugar se estudiaron los conceptos principales de la geología estructural, partiendo desde los tipos de roca y su génesis, y pasando por la tectónica de placas que da lugar a los procesos de deformación de la corteza.

Con lo anterior se observó que de las clases de fallas geológicas existentes, las fallas inversas y de cabalgamiento generan los mayores esfuerzos así como un mayor fracturamiento en la masa de roca adyacente, y por ende, mayores problemas asociados al cruce de éstas que las fallas de tipo normal o de rumbo.

Por otro lado, como información básica para evaluar la incidencia de las fallas geológicas en los túneles en roca de Colombia, se hizo una revisión bibliográfica de los tipos de rocas predominantes en diferentes regiones del país, debido a que la litología de los macizos rocosos en Colombia presenta unas características que lo hacen particular en el tema de fallas geológicas.

En Colombia hay gran variedad de ambientes geológicos (tipos de rocas), con presencia de un sinnúmero de fallas geológicas. Se identificó que la mayoría de las grandes fallas en los Andes colombianos se originó por los procesos de subducción generados por la interacción de las placas tectónicas, como ya se ha mencionado. En la zona andina, las fallas regionales, como la falla frontal de la cordillera Oriental, las fallas del Borde Llanero, las fallas que bordean el valle del Magdalena, el sistema de fallas de Romeral y Cali-Patía, y algunas fallas del litoral pacífico, generalmente presentan una dirección NE, paralelas al sentido de las cordilleras, con algunas excepciones, como es el caso de la falla Santa Marta-Bucaramanga, que tiene una dirección NW.

PROBLEMAS ASOCIADOS A LAS ZONAS DE FALLA

Las zonas de falla que se generan con el movimiento de la actividad de las fallas geológicas representan un problema para las obras de ingeniería, en especial las obras subterráneas, tanto para la etapa de diseño como para la etapa de construcción. Esto se debe a que el material en esta zona sufre cambios considerables en sus condiciones geológicas y geotécnicas, y a causa de la alta permeabilidad de la roca triturada, el agua puede fluir con mayor facilidad. Aparte de lo anterior, las zonas

de falla geológica son la principal razón de colapso en los túneles (figura 1). Por tanto, es importante conocer cuáles son los problemas típicos asociados a las zonas de falla geológica.

Los principales problemas que se presentan durante la construcción de un túnel, aunados a las zonas de falla, se muestran en la tabla siguiente (tabla 1).

Además de lo anterior, asociado también a la excavación de túnel en zonas de fallas geológicas, se debe tener en cuenta que la magnitud y el tipo de problemas dependen del tipo de falla. Su control y manejo está sujeto a su identificación y caracterización.

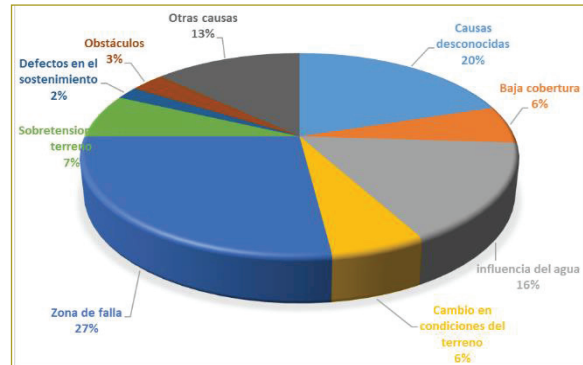


Figura 1. Causas de colapso en los túneles.

Fuente: Vélez y Caro, 2011.

Tabla 1
Problemas del terreno durante la construcción de un túnel

MECANISMO DE FALLA	CONDICIONES DEL TERRENO	DESCRIPCIÓN
Empujes o squeezing	Alta cobertura Altos esfuerzos Presencia de agua Materiales blandos	El <i>squeezing</i> se produce cuando la redistribución de esfuerzos alrededor de la excavación del túnel supera la resistencia del macizo rocoso. Se presenta en rocas plásticas y semiplásticas, milonitas y rocas micáceas.
Cuñas	Presencia de diaclasas, estratificación o foliación. Depende del tamaño del túnel y de la potencia (ancho) de la falla Depende de la resistencia de la roca	Este tipo de falla depende de la orientación del túnel respecto a las discontinuidades.
Gases	Materia orgánica atrapada en depósitos sedimentarios. Descomposición del carbono Oxidación de sulfuros	La presencia de gases se debe principalmente a la descomposición de la materia orgánica o el carbón. Algunos de estos gases pueden ser tóxicos o tener propiedades explosivas, lo que representa un problema durante la construcción de túneles. Los que se encuentran con mayor frecuencia son metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, radón y, con menor frecuencia, hidrógeno.
Terreno que fluye	Agua a presión Gradiente hidráulico Material permeable y suelto	Generalmente se presenta cuando hay materiales permeables, como arena y grava limpia y suelta, o una zona de falla, es decir, un material de alta permeabilidad no consolidado que fluye cuando hay presencia de agua. Este fenómeno se caracteriza por tener un material de baja permeabilidad que no permite el flujo del terreno, y cuando el túnel es excavado y el material de baja permeabilidad es removido se crea una salida para el material suelto.
Terreno que rueda	Materiales no cohesivos y sueltos Depende del tamaño del túnel Puede haber agua	Consiste en el desprendimiento de materiales sin cohesión; se presenta sobre todo en arenas secas y gravas limpias y sueltas.
Rocas expansivas	Minerales potencialmente expansivos Filtraciones de agua	El aumento de volumen o hinchamiento que sufren algunas rocas se debe principalmente a la absorción de agua. Las rocas expansivas más comunes son la marga arcillosa, la argilita, la montmorillonita y las milonitas de falla. Se da principalmente en rocas jóvenes.
Carsticidad	Rocas calizas Filtraciones	Las rocas calizas reaccionan con la presencia de agua y dan lugar a la disolución de la caliza, lo que a su vez genera cavidades en el macizo rocoso.
Rocas agresivas	Terrenos yesíferos Rocas que contienen sulfuros y piritas Filtraciones de agua	Materiales yesíferos o rocas con cierto contenido de sulfuros y piritas pueden generar aguas ácidas fuertemente agresivas en presencia de agua y oxígeno, lo que puede afectar el revestimiento.

Es común que se presenten varios imprevistos durante la construcción del túnel en la zona de falla, lo que da lugar a problemas mayores, como la pérdida del frente de avance, avalanchas o flujos de agua y material; esto, a su vez, impacta los costos y cronogramas del proyecto.

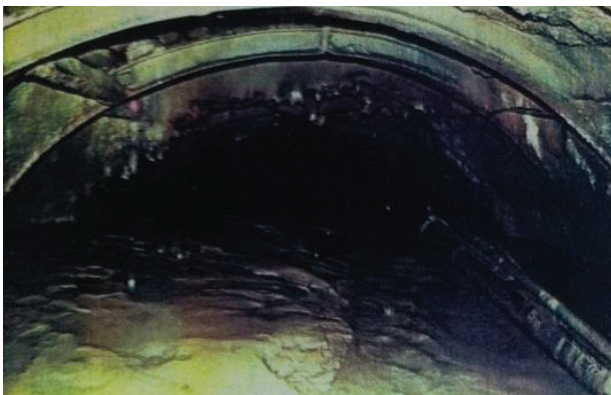
Entre los principales mecanismos de falla durante la excavación de túneles en zonas de falla se destacan los siguientes:

Empujes o *squeezing*

El fenómeno de *squeezing* se produce cuando la redistribución de esfuerzos alrededor de la excavación del túnel supera la resistencia del macizo rocoso. Se presenta en rocas plásticas y semiplásticas, milonitas y rocas micáceas (fotografía 1).



Fotografía 1. Sección de un túnel con problemas de *squeezing*.



Fotografía 3. Proyecto Mesitas. Túnel de Granada II, falla Carrizal.

Fuente: Ingetec S.A.

Hinchamiento o *swelling*

El fenómeno de hinchamiento o *swelling* se presenta en rocas blandas, cuya composición mineralógica incluye minerales expansivos que, al entrar en contacto con el agua, presentan un aumento en el volumen del material.

A continuación se muestra la falla en la solera del túnel debido a problemas de *swelling* (fotografía 2).



Fotografía 2. Proyecto Mesitas.

Fuente: Ingetec S.A.

Terreno que fluye

Este tipo de problemas se presentan generalmente en materiales permeables, como arena y grava limpia y suelta, o una zona de falla, es decir, un material de alta permeabilidad no consolidado que fluye cuando hay presencia de agua a presión. Este fenómeno se caracteriza por tener un material de baja permeabilidad que no permite el flujo del terreno, y cuando el túnel es excavado y el material de baja permeabilidad es removido se crea una salida para el material suelto.

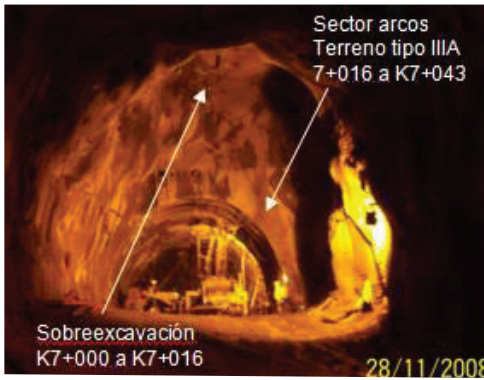
A renglón seguido se muestra el flujo de agua presentado en el túnel de Granada II del Proyecto Mesitas (fotografía 3).



Desprendimientos de roca

Los desprendimientos o cuñas en roca son fallas que ocurren en el macizo rocoso, con presencia de sistemas de discontinuidad que dan lugar a la formación de cuñas.

A continuación se presenta la sobreexcavación generada por el desprendimiento de material en la sección del túnel de carga del proyecto hidroeléctrico Porce III.



Fotografía 4. Proyecto hidroeléctrico Porce III. Túnel superior de carga, zona de cizalla La Primavera.

Fuente: Ingetec S.A.

CONSIDERACIONES PARA CRUZAR ZONAS DE FALLA

Además de estudiar los problemas típicos en las zonas de falla, se hizo una revisión bibliográfica de los métodos constructivos y consideraciones especiales para cruzar dichas zonas.

Durante el diseño y construcción de túneles en macizos rocosos como los que se encuentran en la geología colombiana, es común hallar zonas de fallas cuya presencia es un factor determinante en el momento de escoger un método constructivo, dadas las particularidades que esas zonas presentan.

Consideraciones constructivas y de sostenimiento

Por lo general, una zona de falla se trata de un material de baja calidad que necesariamente requiere sostenimiento. A continuación se muestran las metodologías más comunes o la tecnología de punta para enfrentar diferentes problemas durante la construcción de túneles en dichas zonas de falla. Sin embargo, cabe destacar que, aunque el método que se va a utilizar esté bien estudiado

Tabla 2
Recomendaciones para enfrentar problemas en zonas de falla

MECANISMO DE FALLA	RECOMENDACIONES															
	SOSTENIMIENTO										MÉTODOS CONSTRUCTIVOS					
	Concreto lanzado	Arcos metálicos	Arcos autodeslizantes	Ventanas	Enfilajes	Pernos	Pernos de fibra de vidrio en el frente	Inyecciones	Jet Grouting	Congelamiento	Drenaje	Sección curva	Avances cortos	NAMT	Adeco	Ventilación
Empujes o <i>squeezing</i>	X	X		X	X	X	X				X	X		X		
Cuñas	X		X	X	X	X		X	X		X					
Gases															X	
Terreno que fluye	X				X	X		X	X		X					
Terreno que rueda	X				X	X		X			X					
Rocas expansivas								X				X				
Carsticidad								X			X					
Rocas agresivas											X					
Brecha de falla o milonita	X	X			X	X		X	X		X		X			

con antelación, se debe tener la posibilidad de tomar decisiones finales durante la construcción.

A continuación se presenta una breve descripción de los tipos de sostenimiento y metodologías constructivas para cruzar zonas de falla.

- **Concreto lanzado**

El concreto lanzado es un elemento de soporte o revestimiento que evita la alteración y meteorización de la roca excavada, además de mantener la integridad de la masa. Es uno de los elementos más comunes en el revestimiento de un túnel.

- **Arcos**

Los arcos o cerchas metálicas son otro de los tipos de sostenimiento más comunes e indispensables en zonas donde el tiempo de autosostento es mínimo (por ejemplo, en las zonas de falla). Se ponen en contacto con el terreno en sentido transversal. Longitudinalmente, se unen con travesaños de acero de 25 o 32 mm. Por lo general, actúan en conjunto con el concreto lanzado, formando una armadura que aumenta la resistencia del sostenimiento. En las zonas de falla es común el uso de arcos autodeslizantes que permiten una deformación controlada del material.

- **Pernos**

Los pernos son elementos de sostenimiento que generan confinamiento en el terreno, formando un “anillo de roca reforzada” que ayuda con la estabilización del terreno, es decir, se produce un efecto de compresión en una zona del macizo rocoso. Los pernos son de gran ayuda en problemas de cuñas y en estabilización de terreno con empujes.

- **Enfilajes**

Los enfilajes son un arreglo de pernos ubicados en el techo del túnel y son instalados antes de avanzar en la excavación. Consisten en un presostento del avance del túnel que genera una especie de techo falso que brinda soporte a la excavación. Éstos siempre deben quedar apoyados sobre un arco.

- **Ventanas**

Las ventanas son espacios o cortes que se dejan en el concreto para permitir el movimiento del macizo rocoso excavado y, por tanto, del concreto instalado (cerrando los espacios dejados para tal fin); esta deformación controlada permite liberar esfuerzos y ayuda a evitar deformaciones futuras que puedan fisurar o fracturar el concreto y reducir su eficiencia, o en el peor de los casos, generar fallas dentro del túnel.

- **Inyecciones**

El tratamiento del terreno mediante inyecciones consiste en introducir al terreno un fluido estable, inestable o solución, que mejora las características mecánicas del terreno, disminuye la porosidad y rellena fracturas. La presión, caudal y volumen que se van a inyectar son factores que se deben definir adecuadamente según el tipo de material que se va a inyectar para garantizar un óptimo rendimiento. El *Jet Grouting* es un tipo de inyección que se caracteriza por su alta presión y velocidad de inyección.

Las inyecciones mejoran los parámetros de resistencia del terreno, tales como la cohesión, ángulo de fricción y módulo de deformación.

- **Drenaje**

El drenaje es un método constructivo que se usa en aquellas fallas que se caracterizan por la presencia de materiales con porosidades altas, como las arenas y algunos limos, que tienen gran capacidad para almacenar agua, lo que disminuye la resistencia del material, especialmente la resistencia al corte. Esto se traduce en problemas de inestabilidad durante la construcción.

Dado lo anterior, se debe controlar la cantidad de agua que puede entrar a interactuar con el material, para lo cual se toman medidas para impermeabilizar o drenar, en caso de que la cantidad de agua sea excesiva.

Existen diferentes métodos para hacer el drenaje desde el interior del túnel: realización de un hueco piloto y un túnel piloto que drene el macizo y se pueda evaluar la condición de agua en el macizo rocoso, antes del avance de la excavación; ejecución de sondeos hidrogeológicos longitudinales entre 5 y 20 m, cuyo objetivo es permitir el drenaje por el frente, de manera que a medida que avanza el frente de excavación, el volumen de agua sea menor.

- **Sección curva (solera o piso curvo)**

Este método constructivo es una solución geométrica que consiste en realizar una sección curva (invertida o solera curva) que permite enfrentar problemas asociados especialmente a empujes o *squeezing*. Con esto se busca tener una mejor redistribución de esfuerzos, de que no se generen zonas donde haya concentración de esfuerzos, como puede ocurrir en una sección rectangular, donde el cambio de dirección de la sección en las esquinas genera una concentración de los esfuerzos.

- **NATM (Nuevo Método Austriaco de Excavación de Túneles)**

El NATM es una metodología empírica para diseño y construcción de túneles que, más allá de ser un método, es un concepto o una filosofía que consiste en dejar deformar el macizo rocoso que rodea la excavación del túnel, en la zona plástica, para dar lugar a la relajación de esfuerzos. Dicha deformación se permite hasta un punto de equilibrio en el cual el soporte asignado (en caso de que lo requiera) empieza a trabajar. Con esto se pretende liberar energía en forma controlada, que por el contrario podría liberarse de manera descontrolada, lo que daría lugar a fallas dentro del túnel.

En el método NATM se establece la instalación de un sostenimiento inicial, compuesto, por ejemplo, de concreto lanzado, pernos y arcos, lo que facilita el movimiento del macizo rocoso; una vez que las deformaciones se han atenuado, se instala el revestimiento final, de manera que éste queda expuesto a tensiones muy bajas, permitiendo que su espesor sea significativamente menor y que se evite la generación de fracturas.

El método incluye la excavación por etapas y la instalación de instrumentación y control de deformaciones a través del monitoreo del túnel.

- **Adeco-RS (*Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils*)**

Cuando se empezó a considerar el avance del túnel como un factor de diseño, se avanzó a ritmos mucho más altos en la excavación. Esta metodología se denominó Adeco (Análisis de las deformaciones controladas en rocas y suelos), la cual consiste en realizar la excavación del túnel a sección completa. A grandes rasgos se

puede decir que se trata de un método NATM a sección completa con estabilización del frente, que requiere un equipo mayor y, por tanto, mayor espacio de trabajo y mayor alcance operativo.

Este método tiene como principio fundamental la deformación controlada del macizo rocoso, lo que depende de la calidad del material y de su estado de esfuerzos a través de todas las etapas, desde antes de la excavación del túnel hasta la instalación del sostenimiento. El estado de esfuerzos es fundamental durante el proceso de excavación por la concentración de esfuerzos generada alrededor del túnel, lo que se conoce como el efecto de arco, del cual depende la integridad de la excavación.

En el Adeco-RS se incluye el análisis de la deformación presentada en cada caso, así como el control de ésta.

Instrumentación y monitoreo

El proceso de monitoreo y seguimiento de un túnel no debe limitarse a su etapa constructiva. Por el contrario, debe mantenerse a lo largo de su vida útil, de manera que se pueda conocer la evolución a largo plazo de las deformaciones y tensiones del sostenimiento, identificando así su deterioro y si es necesario hacer algún tipo de reparación o refuerzo. Por ello, plantear secciones de auscultación en las zonas de falla es indispensable tanto a corto como a largo plazo, debido a que estas secciones se plantean (durante la construcción) en las áreas donde hay mayor inestabilidad geotécnica, es decir, donde se presentan las mayores deformaciones y presiones. La auscultación de las zonas de falla se realiza en la etapa de sostenimiento.

Existen unas secciones para evaluar convergencias y otras para hacer auscultación total. Las primeras se pueden ubicar, dependiendo de la calidad del macizo, de 5 a 10 m. En condiciones de terrenos buenos puede ser cada 25 m a lo largo del túnel, y las de auscultación total, cada 100 m.

La auscultación de las secciones está compuesta así (Vélez & Caro, 2011):

- Pernos de convergencia en el avance que forman líneas de lectura diagonales y horizontales para medir desplazamientos y velocidades de deformación.
- Asientos topográficos en pernos de la clave y paredes para hallar hinchamientos en el terreno.

- Celdas de presión radial y tangencial para medir los esfuerzos que sufre en concreto.
- Extensómetros de una o múltiple posición, con varillas para medidas longitudinales que permitan conocer los desplazamientos en el interior del macizo rocoso en puntos de la clave y las paredes. Facilitan la delimitación de zonas con influencia plástica de las zonas con influencia elástica.

CASOS HISTÓRICOS DE TÚNELES CON FALLAS GEOLÓGICAS EN COLOMBIA

Durante el desarrollo de proyectos viales e hidroeléctricos se han encontrado algunos casos históricos de túneles en Colombia que han atravesado una o varias fallas geológicas. Se tomaron 53 fallas, de las cuales se evaluaron características como el tipo de rocas atravesadas, cobertura, espesor y orientación de la falla, deformaciones presentadas durante la excavación y tipo de soporte utilizado en dicha zona. Entre los principales proyectos se encuentran los siguientes:

- Proyecto hidroeléctrico El Guavio: túnel superior de carga, túnel de fuga, túnel inferior de carga y túnel de acceso.
- Proyecto Mesitas: túnel de Granada II.
- Proyecto Chingaza: túnel de Siberia y túnel de Palacio-Rioblanco.
- Proyecto hidroeléctrico Chivor: Chivor I (túnel de carga) y Chivor II (túnel inferior de conducción).
- Desviación del río Tunjita: túnel de desviación.
- Central hidroeléctrica La Miel I: túnel de fuga.
- Proyecto hidroeléctrico Porce III: túnel inferior de conducción.
- Túnel piloto de La Línea.
- Túnel de Buenavista.
- Túnel del Boquerón.

REVISIÓN ANALÍTICA Y NUMÉRICA DE LOS CASOS HISTÓRICOS

Una vez recopilada la información de algunos túneles en Colombia en los que se han atravesado zonas de falla geológica durante su construcción, se identificaron las variables que se consideraron de mayor influencia sobre el comportamiento de la zona de falla. A continuación se describe el procedimiento realizado para

el procesamiento y análisis de los datos recopilados en cada caso, en los que se revisaron los aspectos más relevantes, tales como diámetro del túnel, nombre de la falla atravesada por el túnel, tipo de falla, origen de la roca, edad geológica, tipo de roca, resistencia de la roca intacta, cobertura y espesor de la falla, inclinación de la falla, RQD, deformación máxima registrada de convergencia en el interior del túnel, caudal máximo de infiltración, al igual que problemas asociados a la falla, como desprendimientos, empujes y flujos o avalanchas. También se revisó el tipo de soporte utilizado para cruzar la falla.

A los aspectos más relevantes e influyentes en el comportamiento de la zona de falla se les dio una calificación de tipo cualitativo, que posteriormente permitió estimar un coeficiente representativo (coeficiente de falla). También se calcularon otros coeficientes que son representativos de la falla y sirven para obtener relaciones entre otras variables, como el coeficiente de esfuerzos y el coeficiente geométrico (de la falla y del túnel).

Coeficiente de esfuerzos

El coeficiente de esfuerzos se definió como la relación entre la resistencia de la roca intacta y el esfuerzo vertical en la zona de falla. Para efectos de este cálculo el esfuerzo vertical se obtuvo como el peso del material por la cobertura. Por lo tanto, un C_E menor que 1 indicará unas condiciones pobres de la roca en la zona de falla, mientras que un C_E mayor que 1 indicará mejores condiciones de la roca. Sin embargo, esto no implica que una roca con C_E mayor que 1 deba tener un buen comportamiento durante la excavación, ya que hay más aspectos que influyen en el comportamiento de la excavación del túnel en la zona de falla.

$$C_E = \frac{\sigma_{c \text{ roca intacta}}}{\sigma_v}$$

Donde:

$$\sigma_v = \gamma \cdot H.$$

H = cobertura (m).

γ = peso de la roca (kn/m^3).

σ_v = esfuerzo vertical (MPa).

$\sigma_{c \text{ roca intacta}}$ = resistencia a la compresión de la roca intacta (MPa).

Tabla 3
Tabla sugerida para caracterizar zonas de falla en túneles

PARÁMETRO				VALORES			
I	TIPO DE FALLA	Rumbo	Normal	Inversa		Cabalgamiento	
	CALIFICACIÓN	1	2	3		4	
II	TIPO DE ROCA	*Metamórficas *Ígneas *Metamórficas - ígneas		*Metamórficas - sedimentarias *Ígneas - sedimentarias		Sedimentarias	
	CALIFICACIÓN	1		2		3	
III	EDAD	Devónico	Paleozoico	Jurásico	Cretáceo	Terciario	
	CALIFICACIÓN	1	2	3	4	5	
IV	RESISTENCIA DE LA ROCA INTACTA	Muy Dura	Dura	Media	Blanda	Muy Blanda	
	CALIFICACIÓN	> 100	60 - 100	40 - 60	20 - 40	< 20	
V	COBERTURA	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	
	CALIFICACIÓN	0 - 200	200 - 400	400 - 600	600 - 800	800 - 1000	
VI	ESPOSOR	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	
	CALIFICACIÓN	< 10	10 - 100	100 - 300	300 - 500	> 500	
VII	INCLINACIÓN DE LA FALLA	Alta		Media		Baja	
	CALIFICACIÓN	90-60		60-30		<30	
VIII	α = ángulo respecto al túnel	Normal o perpendicular		Sesgado		Muy sesgado	
	CALIFICACIÓN	0 - 30		30 - 60		60 - 90	
IX	RQD	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo	
	CALIFICACIÓN	100 - 80	80 - 60	60 - 40	40 - 20	< 20	
X	RMR	Muy alto	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo	
	CALIFICACIÓN	100 - 80	80 - 60	60 - 40	40 - 20	< 20	
XI	Coefficiente de deformación (CD)	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	
	CALIFICACIÓN	0 - 1 %	1 - 3 %	3 - 5 %	5 - 10 %	10 - 20 %	
XII	CAUDAL DE INFILTRACIÓN	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto	
	CALIFICACIÓN	0 - 40	40 - 80	80 - 120	120 - 160	160 - 200	
XIII	EVENTOS	Sin eventos	Empujes bajos	Desprendimientos	Empujes medios	*Flujos e irrupciones o avalanchas *Derrumbes o chimeneas *Empujes altos	
	CALIFICACIÓN	1	2	3	4	5	
XIV	TIPO DE SOPORTE	Sin soporte, solera recta	Concreto lanzado, solera recta	Concreto lanzado, pernos, solera recta	Concreto lanzado, pernos, arcos, solera curva	Concreto lanzado, pernos, arcos, enfilajes, solera curva	Concreto lanzado, pernos, arcos, enfilajes, inyecciones o drenaje, solera curva
	CALIFICACIÓN	1	2	3	4	5	6
XV	SISTEMAS ESPECIALES	No requirió nada		Inyecciones y drenaje		*Galería piloto e inyecciones química *Bypass y sistema de drenaje e inyecciones	
	CALIFICACIÓN	1		2		3	
COEFICIENTE DE FALLA		Bajo		Medio		Alto	
CF=I+II+III+IV+V+VI+VII+VIII+IX+X+XI+XII+XIII+XIV+XV		15 - 32		32 - 45		45 - 67	

Coefficiente geométrico

Con el coeficiente geométrico se busca relacionar las dimensiones que tiene la falla respecto al túnel, para lo cual se plantearon dos coeficientes; en el primero se relacionaron el espesor y la cobertura de la falla con el diámetro del túnel, y en el segundo coeficiente se relacionó la orientación de la falla respecto al eje del túnel con el buzamiento o inclinación de la falla. De acuerdo con lo anterior, el coeficiente 1 se estimó en la siguiente forma:

$$C_{G1} = \frac{\text{Cobertura}}{\text{Espesor} \cdot \text{diámetro}}$$

Donde:

Cobertura = corresponde a la cobertura del túnel de la zona de falla (m).

Espesor = corresponde al espesor de la falla que atraviesa el túnel (m).

Diámetro = corresponde al diámetro del túnel (m).

El coeficiente 2 está dado por:

$$C_{G2} = \frac{\alpha}{\beta}$$

Donde:

α = ángulo de la falla respecto al túnel.

β = inclinación de la falla o buzamiento.

Coefficiente de falla

Este coeficiente caracteriza la falla cualitativamente, de acuerdo con varios aspectos, entre los cuales se encuentran la resistencia de la roca intacta, cobertura y espesor de la falla, buzamiento, orientación respecto al túnel, RQD y deformación máxima.

Con base en lo anterior, se propone una clasificación o caracterización aproximada de zonas de falla en túneles, la cual incluye los parámetros mencionados y que, de acuerdo con la experiencia observada en cada caso, son determinantes para el comportamiento de la zona de falla durante la excavación del túnel. Esta caracterización permite dar una calificación cualitativa a la falla, incluyendo factores importantes como la deformación. Dicha clasificación se presenta en la tabla anterior (tabla 3).

Análisis de resultados

Una vez procesada la información de los túneles en zonas de falla con la metodología sugerida en este trabajo de grado, se evaluó la relación entre el coeficiente de falla (C_F) y varias de las variables usadas para su cálculo; también se relacionaron algunas variables entre sí.

En los resultados obtenidos, se encontró que las fallas de mayor C_F son:

Tabla 4
Fallas con mayor C_F

N.º de falla	TÚNEL	FALLA
7	Túnel de fuga	Falla de Santa María
8	Túnel de fuga	Falla de San Luis
16	Túnel de carga	Falla de Canoas
19	Túnel de Granada II	Falla Carrizal
25	Túnel de Palacio y Rioblanco	Falla 2
26	Túnel inferior, túnel 1	Falla de Santa María
42	Túnel piloto de La Línea	Falla Alaska
43	Túnel piloto de La Línea	Falla El Viento
44	Túnel piloto de La Línea	Falla La Vaca
46	Túnel piloto de La Línea	Falla San Jerónimo-La Soledad
47	Túnel piloto de La Línea	Falla La Cristalina

Al relacionar algunas variables y coeficientes entre sí, se halló que no hay una relación directa entre los coeficientes geométricos y las demás variables; esto se puede deber a que el comportamiento de la falla durante la construcción del túnel no depende sólo de factores geométricos, como la cobertura, espesor, orientación de la falla respecto al túnel y buzamiento de la falla, sino también de la geometría del túnel, resistencia de la roca, calidad del material y presencia de agua. Esto significa que las variables geométricas no influyen directamente sobre el comportamiento, pero sí afectan otros aspectos; por ejemplo, si la falla es muy sesgada puede presentar mayores problemas, pero no controla la deformación del túnel.

Así mismo, entre el coeficiente de falla y el coeficiente de deformación se encontró una relación exponencial directa, lo que es consecuente con la realidad. Es decir, un coeficiente de falla alto es indicador, como se ha mencionado, de un terreno de mala calidad, donde se pueden presentar grandes deformaciones.

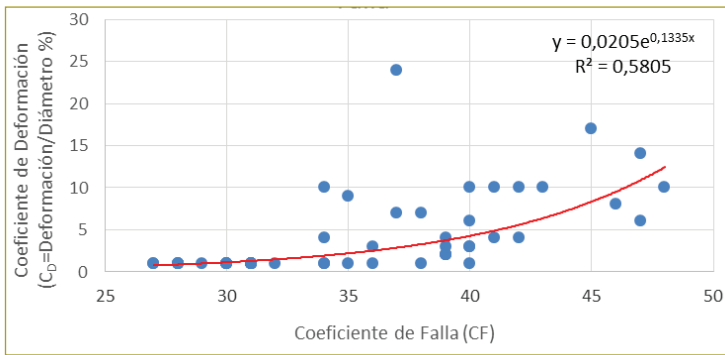


Figura 2. Relación entre el coeficiente de falla y el coeficiente de deformación.

Para terrenos mejores, es decir, C_F bajo, las deformaciones serán pequeñas también. En la gráfica anterior se puede observar la relación entre C_F y C_D (figura 2).

PROPUESTA PARA ESTIMAR DEFORMACIONES DE CONVERGENCIA

De acuerdo con las relaciones establecidas entre las variables definidas anteriormente, se encontró que el coeficiente de deformación tiene una relación directa con el coeficiente de falla. Con esto, es posible plantear un método para estimar deformaciones con la siguiente metodología.

Con esta expresión, obtenida a partir de las relaciones encontradas, se puede obtener el coeficiente de deformación

$$C_D = 0,0205 e^{0,1335 C_F}$$

Donde:

C_D = coeficiente de deformación.

C_F = coeficiente de falla.

Con el coeficiente de deformación es posible obtener la deformación máxima estimada, para un diámetro del túnel dado

$$C_D (\%) = \frac{\text{Deformación máxima (m)}}{\text{Diámetro del túnel}} \times 100$$

Resolviendo

$$D_{máx e} = \frac{C_D * \text{Diámetro del túnel}}{100}$$

Obteniendo así la deformación máxima estimada ($D_{máx e}$) en m.

MEDIDAS PARA EL CRUCE DE FALLAS

Una vez estimada la deformación del túnel en una zona de falla, se propone el uso de uno o varios tipos de sostenimiento y métodos constructivos de acuerdo con la magnitud de dicha deformación, así como el empleo de instrumentación.

Tipo de soporte

En la tabla siguiente se presentan los tipos de soporte para cruzar zonas de falla dependiendo de la magnitud de la deformación estimada, para controlar las deformaciones y evitar que colapse el túnel (tabla 5).

En caso de evidenciar la presencia de agua con altas presiones hidráulicas después del uso de drenaje o perforación piloto, se recomienda utilizar inyecciones para mejorar las características del terreno y evitar flujo de agua hacia el túnel. La aplicación del tipo de inyecciones, como cemento o químicas, dependerá de las características de permeabilidad de la mezcla dentro del material que hay que reforzar.

Por otra parte, se debe tener en cuenta el tiempo de instalación de la solera curva; ha de ser un tiempo tal que permita algo de deformación pero que no se coloque muy tarde, para que las deformaciones no vayan a ser excesivas.

Se debe aclarar que el dimensionamiento de los elementos de soporte sugeridos en la tabla, como el espesor del concreto lanzado, longitud y espaciamiento de los pernos, espaciamiento de los arcos, tipo y diámetro del enfilaje, o densidad y tipo de pernos de fibra de vidrio, dependerá del diámetro del túnel por construir, como de las características propias de los materiales encontrados y la condición de esfuerzos *in situ*.

Instrumentación propuesta

Como parte de las medidas propuestas para atravesar fallas se plantea el empleo de instrumentación geotéc-

Tabla 5
Medidas propuestas para el cruce de fallas

ESTADO	DEFORMACIÓN (%)	COEFICIENTE DE FALLA (C_f)	SR	SC	CLR	PN	PL	AL _r	AP _d	E _L	E _p	PFV	DR	INY	SE
Nulo o leve	0 - 1	15 - 29	X			X									
Medio (1)	1 - 5	29 - 41	X		X	X		X		X					X
Alto (1) y (2)	5 - 10	41 - 46		X	X		X		X			X	X	X	X
Muy alto	< 10	> 46		X	X		X		X		X	X	X	X	X

SR: Solera recta.

SC: Solera curva. Cierre del anillo completo de soporte (1) y (2).

CLR: Concreto lanzado reforzado (1) y (2).

PN: Pernos normales inyectados con lechada.

PL: Pernos largos inyectados con lechada y pernos en la solera (1).

AL_r: Arcos livianos rígidos.

AP_d: Arcos pesados autodeslizantes. Juntas de asimilación de deformaciones (ventanas en el concreto lanzado) (1) y (2).

E_L: Enfilajes livianos, pernos autopercutores.

E_p: Enfilajes pesados. Dependiendo de la característica del material del frente se pueden requerir pernos de fibra de vidrio en el frente, y si se adopta, excavar en sección completa (2).

PFV: Pernos de fibra de vidrio (2).

DR: Drenaje. En presencia de agua en el frente, uso de hueco o galería piloto.

INY: Inyecciones. Dependiendo de las condiciones del material del frente de avance y de la presencia de agua.

SE: Sobrexcautación. Prever línea de sobrexcautación para asimilar deformaciones.

(1) Se puede excavar en etapas o fases, según el método NATM para el control de deformaciones, y colocar gradualmente el sostenimiento. Esto para túneles con diámetros iguales o superiores a 5 m.

(2) Se puede adoptar el método Adeco, dependiendo de las características del material y si se requiere avanzar en sección completa.

nica, que permita hacer un monitoreo y un seguimiento a las deformaciones del túnel. Se propone el uso de:

- *Extensómetros de cinta.* Con estos extensómetros se puede conocer la convergencia del túnel. Los puntos de control se recomiendan de acuerdo con el tipo de terreno de la zona de falla. Por ejemplo, para un terreno con empujes bajos se recomienda una separación entre 15 y 20 m, mientras que en un terreno de empujes medios la separación debe ser del orden de 10 m, y para un terreno con empujes altos se recomiendan separaciones no mayores de 5 m.
- *Piezómetros.* Permiten verificar y controlar niveles y presiones piezométricas que puede desestabilizar el túnel y desencadenar problemas de flujos de material. Además, este tipo de instrumentación permite identificar si las presiones siguen siendo altas aun con el uso de drenajes, lo que permite tomar decisiones acerca del empleo de inyecciones.
- *Celdas de carga o celdas de presión.* Se pueden usar en los elementos de soporte, como arcos metálicos o embebidos en el concreto lanzado
- *Extensómetros de múltiple posición.* Se pueden emplear en secciones radiales transversales al túnel y en el caso del método Adeco, extensómetros de una o múltiples posiciones para monitorear las deformaciones de extrusión del frente de excavación.

Vale la pena señalar que la instrumentación debe ir acompañada de un control adecuado, con la toma de lecturas con cierta periodicidad e interpretación, que permitan adoptar medidas a tiempo y evitar colapsos o daños graves en el túnel. Medidas adicionales de sostenimiento o control, como el uso de más concreto lanzado, pernos adicionales de mayor densidad o más largos o inyecciones. Pueden aplicarse dentro del proceso constructivo para garantizar la estabilidad del túnel en zona de falla geológica.

CONCLUSIONES

- Colombia es una región con innumerables fallas geológicas. La mayoría de las grandes fallas en los Andes colombianos se originaron por los procesos de subducción generados por la interacción de las placas tectónicas, como ya se ha mencionado.
- En los casos históricos evaluados (53 fallas en túneles colombianos), los principales problemas identificados corresponden a empujes en diferentes grados, flujos de agua y desprendimientos y avalanchas.
- Los elementos de sostenimiento más comunes en los 53 fallas estudiadas fueron concreto lanzado reforzado con malla o fibra, pernos de anclaje y arcos metálicos autodeslizantes. En los casos más graves se utilizaron solera curva y núcleo central temporal

mientras se colocaba el soporte y cierre del anillo de sostenimiento completo.

- La calificación de las fallas indica que un valor pequeño refleja una falla con menores problemas, mientras que un valor mayor indica unas condiciones más pobres de la masa de roca en la zona de falla. El valor del coeficiente de falla, según el planteamiento presentado en este trabajo de grado, está en un rango entre 15 y 67.
- Existen clasificaciones geomecánicas, tales como el RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski, o el Q System de Barton, o el RSR (*Rock Structure Rating*) de Wickham, así como el GSI (*Geological Strength Index*) de Hoek, pero están muy enfocadas en macizos rocosos de características mejores que aquellos materiales que pueden hallarse en zona de falla geológica. No toman en cuenta los mecanismos de falla que se producen durante la excavación de un túnel.
- Se logró establecer una metodología inicial aproximada a partir de precedentes en Colombia con los 53 casos analizados, para así proponer una clasificación de zonas de fallas en túneles en roca. Dicha metodología, si bien es de tipo empírico, permite estimar las deformaciones del túnel de acuerdo con el coeficiente de falla. Éste dependerá del origen de la roca, resistencia de la roca intacta, cobertura, espesor de la falla, buzamiento, orientación respecto al túnel, RQD y caudal de infiltración de agua subterránea.
- La metodología propuesta permite definir de manera preliminar los elementos de soporte principal que, en conjunto con la instrumentación, facilitan estabilizar la zona y llevar un control adecuado de las deformaciones.
- Se considera fundamental llevar instrumentación geotécnica ante la presencia de falla geológica en los túneles.
- La metodología propuesta ayuda a identificar la criticidad de las fallas, a definir rangos de deformación de convergencia posibles y a establecer elementos de sostenimiento básicos para salvar este tipo de accidentes geológicos en la construcción de túneles. Para establecer la magnitud o cantidad específica de los elementos de soporte sugeridos en procesos o etapas más avanzadas de diseño, se deben aplicar metodologías de análisis y diseño mediante modelos más rigurosos (por ejemplo,

analíticos o numéricos), en conjunto con una adecuada caracterización del macizo rocoso en la zona de falla geológica.

REFERENCIAS

- Barla, G. (mayo de 2012). Construcción de túneles en condiciones de deformación (*squeezing*). *Ingeo/Túneles*, tomo 18, cap. 5.
- Billings, M. P. (1963). *Geología estructural*. Buenos Aires: Eudeba.
- Davis, G. & Reynolds S. (1996). *Structural Geology of Rocks and Regions* (2nd ed.) United States of America: John Wiley & Sons, Inc., Chapter 6.
- Díez López, J.R. & López Jimeno, C. (2011). Influencia de la geología del terreno en el diseño y construcción de túneles. *Manual de túneles y obras subterráneas*, tomo I, cap. 9. Madrid: Gráficas Arias Montano S.A.
- Frith, R.C. & Whittaker, B. (1990). *Tunneling, Design, Stability and Construction*. Londres: The Institution of Mining and Metallurgy.
- González, H., Núñez, A. & París, G. (1988). *Mapa geológico de Colombia: memoria explicativa*. Bogotá: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (Ingeominas) (ahora Servicio Geológico Colombiano).
- Hoek, E. (2001). Big Tunnels in Bad Rock. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127, 9: 726-740.
- Ingetec S.A. (noviembre de 1976). Quinto Programa de Ensayos, Proyecto Mesitas. Construcción de túneles y obras complementarias. Licitación M-02. Información de referencia. Apéndice 3. Bogotá.
- Ingetec S.A. (enero de 1986). Proyecto Mesitas. Túneles y obras complementarias. Informe técnico N.º 12. Túnel de Granada, sector I. Avalancha y rehabilitación en K1+826. Bogotá.
- Ingetec S.A. (mayo de 1995). Proyecto Hidroeléctrico El Guavio. Túnel superior de carga y galería y pozo de la almenara. Excavación y construcción. Informe de obra construida N.º 5. Bogotá.
- Ingetec S.A. (junio de 1995). Proyecto Hidroeléctrico El Guavio. Túnel de fuga. Excavación y construcción. Informe de obra construida N.º 6. Bogotá.
- Ingetec S.A. (febrero de 1995). Proyecto Hidroeléctrico El Guavio. Túnel de acceso. Excavación y construcción. Informe de obra construida N.º 2. Bogotá.
- Ingetec S.A. (noviembre de 1974). Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá. Proyecto Hidroeléctrico Chivor. Excavación del túnel de carga y almenara. Informe técnico. Bogotá.
- Ingetec S.A. (agosto de 1997). Carretera Bogotá-Villavicencio. Túnel de Buenavista. Conceptos y recomendaciones sobre los procedimientos de construcción del túnel. Bogotá.
- Ingetec S.A. (enero de 2010). Asesoría Porce III. Proyecto Hidroeléctrico Porce III. Excavación, soporte y revestimiento del conducto de carga I. Bogotá.
- Ingetec S.A. (2003). Proyecto Hidroeléctrico Miel I. Obras subterráneas. Informe final. Bogotá.
- Integral Ingenieros Consultores (abril de 1985). Proyecto Hidroeléctrico de San Carlos. Informe de construcción. Túnel de presión N.º 1, Pozo de presión N.º 1 y almenara N.º 1. Medellín.
- Integral Ingenieros Consultores (marzo de 1989). Proyecto Hidroeléctrico Riogrande II. Informe de construcción, construcción de las obras de captaciones, túneles de presión y obras anexas para las centrales Niquía y La Tasajera. Tomo II. Medellín.
- Tarbut, E. & Lutgens, F. (1999). *Ciencias de la tierra: una introducción a la geología física* (6.ª ed., cap. 15). Madrid: Prentice Hall.

Terrón Almanara, J. (mayo de 2012). Aspectos geológico-geotécnicos en el cruce de fallas. *Ingeo/Túneles*, tomo 18, cap. 4, pp. 81-99.

Terrón Almanara, J. (2013). Técnicas constructivas en el cruce de fallas. *Ingeo/Túneles*, tomo 19, cap. 3, pp. 77-101.

Vélez Pérez, H. & Caro Perdigón, P. (2011). Túneles en terrenos con fallas. *Manual de túneles y obras subterráneas*, tomo II, cap. 34, pp. 1207 - 1272. Madrid: Gráficas Arias Montano S.A.

Estudio de seguridad vial para determinar la incidencia del diseño geométrico en la accidentalidad en la carretera Bogotá-Villavicencio, a partir de la salida del túnel de Boquerón a Puente Quetame

Road safety study to determine the impact of the geometric design in accidentality on the Bogotá-Villavicencio road from Boquerón road tunnel exit to Puente Quetame toll

NANCY CIFUENTES OSPINA

Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

nancy.cifuentes@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 10/04/2016 Aceptado: 22/08/2016

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

Resumen

Los accidentes viales son uno de los mayores problemas en salud pública a escala internacional por las lesiones que ocasionan, lo que hace que sea prioridad identificar sus causas y tomar medidas para prevenirlos. Según estudios recientes, se ha establecido que los accidentes en las vías tienen que ver con factores como el usuario, el vehículo y la infraestructura.

En el presente estudio se pretende determinar la relación entre la accidentalidad y el diseño geométrico y de tránsito en la carretera Bogotá-Villavicencio, específicamente en el tramo comprendido entre la salida del túnel de Boquerón y el peaje de Puente Quetame, en su estado actual y en etapa de diseño. Para esto se implementaron listas de verificación, considerando los parámetros de diseño geométrico del *Manual de diseño del Inviás* (2008) y los factores de seguridad preventivos para carreteras, lo cual es compatible con el enfoque que se aplica actualmente en las auditorías de seguridad vial. Con este trabajo se busca detectar puntos críticos de accidentalidad, índices de accidentalidad y su relación con la geometría actual de la vía, y en la etapa de diseño se pretende identificar la consistencia del diseño geométrico con parámetros de seguridad para determinar su incidencia en accidentes viales.

Palabras claves: seguridad vial, accidentalidad, factores de riesgo en accidentalidad, indicadores de accidentalidad, diseño geométrico.

Abstract

Traffic accidents have been a worldwide public health concern due to the injuries that they cause, which makes identifying their causes and taking actions to control them top priorities. Research establishes that accidents have a connection with factors like user, vehicle type, and infrastructure.

This study expects to determine the relationship between accidentality and the geometrical and traffic design on the road Bogotá-Villavicencio on the stretch between Boqueron road tunnel exit and Puente Quetame toll, in its current condition and design stage. To achieve that, checklists were used considering the geometrical design parameters established by Inviás design manual and the preventive security factors for roads. The results are expected to detect the critical accident points, accident indexes, and their link with the current geometry of the road and in the design stage, the geometric designs' consistence with security parameters, determining their incidence on traffic accidents.

Keywords: road safety; accidentality; risk factors on accidentality; accidentality indexes; geometric design.

INTRODUCCIÓN

Los accidentes viales se han convertido en una prioridad a escala internacional por su relación con la salud pública y uno de los grandes problemas en el país debido a las lesiones ocasionadas por éstos. Según estadísticas del Instituto de Medicina Legal y Ciencias Forenses en Colombia, la segunda causa de muerte, después de los homicidios, son los accidentes viales; en el año 2012 se presentaron 5304 muertes, que corresponden a un 23 % y 33.564 lesiones no fatales, correspondientes al 26 %. Así, los accidentes de tránsito se convierten en una de las primeras causales de mortalidad, afectando el presupuesto de salud por el costo elevado de los tratamientos de los heridos, aparte de los daños sociales y materiales, que alcanzan también costos significativos en la economía.

La ruta Bogotá-Villavicencio muestra una gran afluencia de vehículos automotores, conformados por camiones, buses y automóviles; esta es una de las principales rutas por donde circula la mayor parte de la carga del país y donde la accidentalidad por la geometría de la vía se constituye en un enorme problema, lo que amerita un estudio sobre la incidencia que tiene el diseño geométrico en la accidentalidad, para así tomar medidas preventivas en los puntos críticos y en los diseños, identificar con antelación los posibles riesgos de accidentalidad y hacer sugerencias para mejorar la seguridad vial.

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio es evaluar la incidencia del diseño geométrico en la accidentalidad vial a partir de un modelo de auditoría de seguridad vial en la carretera Bogotá-Villavicencio, específicamente en el tramo comprendido entre el túnel de Boquerón a Puente Quetame, tanto en la etapa actual como en la etapa de diseño, con el fin de identificar los lugares que manifiestan elevadas ocurrencias de accidentes, como en sitios con deficiencias en los que no hay manifestación de accidentes en un momento dado, pero que pudiesen ocasionar elevadas incidencias. Para esto se requirió:

- Determinar los puntos críticos de accidentalidad a partir de la observación de los comportamientos operacionales.
- Revisar las características geométricas de la carretera en la etapa actual y de diseño, de acuerdo con especificaciones técnicas.
- Hacer un análisis estadístico de la accidentalidad en la vía objeto de estudio, indicando el tipo de accidente.
- Evaluar el riesgo de accidentalidad en la carretera de estudio en las etapas de operación y diseño.

ANTECEDENTES

El estudio de la accidentalidad se ha convertido en tema de investigaciones en instituciones gubernamentales y universidades. Es de considerar que la preocupación por la accidentalidad es un problema mundial y son muchos los factores que la pueden ocasionar, como los vehículos, usuarios e infraestructura.

Algunos de los estudios efectuados para determinar la incidencia del diseño geométrico en la accidentalidad, los cuales permiten ser el soporte de la presente investigación, donde se considera la infraestructura de la vía como un criterio que hay que tener en cuenta en la accidentalidad, son:

- “Incidencia de las características geométricas y de tránsito de vías en alta montaña y de bajas especificaciones geométricas sobre la accidentalidad”. Realizado en el año 2009 por los ingenieros Carlos Fabián Flórez y Fredy Alberto Reyes de la Universidad Javeriana, permite establecer la relación entre el número de accidentes y el diseño geométrico de la vía, así como llegar a la conclusión de que existe una correlación entre los accidentes y las características geométricas de alta montaña y bajas especificaciones, y con mayor accidentalidad en tramos curvos que en los rectos.
- “Traffic safety in developing countries: a case study in Colombia”. En este estudio, hecho por el ingeniero Santiago Henaó, se contempla que una de las principales causas de muerte son los accidentes viales, razón por la que se hace necesario identificar los puntos de mayor accidentalidad y las causas. Gracias al estudio de caso, efectuado en la ruta Bogotá-Tunja-Sogamoso, se determinó que existe una correlación entre características geométricas de la vía y los accidentes.
- “Evaluar los diferentes elementos de la infraestructura vial, que influyen en la accidentalidad y seguridad vial de los usuarios de las vías interurbanas (peatones, ciclistas, motociclistas, pasajeros y ocupantes de vehículos de cuatro ruedas), a partir del estudio de caso de la carretera Medellín-Bogotá, ruta 50 (tramo

Guaduas-Villeta)”. Estudio hecho en el 2011 por Yefer Asprilla Lara, de la Universidad de los Andes, en el cual los resultados obtenidos indican la trascendencia que tienen los elementos de la infraestructura en la seguridad vial de los usuarios, al igual que la importancia de utilizar equipos y *software* especializados, como los empleados por el Programa Internacional de Evaluación de Carreteras (IRAP, por su sigla en inglés), para determinar el nivel de seguridad de las carreteras principales, secundarias, concesionadas y no concesionadas.

METODOLOGÍA

La clase de investigación realizada es explicativa-analítica, ya que permite establecer las causas de la accidentalidad en el tramo de ruta de salida del túnel de Boquerón a Puente Quetame, donde se establece una relación causa-efecto y es posible sacar conclusiones que se pueden utilizar para estudios que traten este tema.

Las fases del trabajo se desarrollaron de la siguiente manera:

Revisión de información existente

El trabajo se elaboró a partir de una información secundaria de datos de accidentalidad en el periodo 2010-2012, entregada por el Fondo de Prevención Vial, la concesión Coviandes y el Ministerio de Transporte. Con esta información se creó una base de datos, la cual se organizó para hacer el análisis de accidentalidad ocurrido en la vía objeto de estudio.

La información del diseño geométrico y del tránsito se tomó de los documentos entregados por la concesión Coviandes, encargada de que el tramo de estudio se realizara con los planos de diseño geométrico de la carretera actual y el proyectado en doble calzada.

Trabajo de campo

Se efectuó el recorrido por la vía de estudio en el estado actual, realizando toma de registro fotográfico y localización de puntos con GPS cada 1000 m, con el objeto de analizar la relación del diseño de la vía con cada evento ocurrido y establecer un sistema de información a partir de la herramienta de Google Maps.

El registro de los datos de campo se hizo con base en la metodología empleada en las auditorías de seguridad vial (ASV), para obtener información sobre:

- Número de ruta.
- Sección de la carretera principal, identificación del lugar y punto de referencia (PR) en kilómetros.
- Descripción del punto en cuanto a diseño geométrico.
- Descripción de obstáculos en la vía.
- Señalización.

Estudio estadístico del análisis de la accidentalidad

Los datos de accidentalidad en la ruta de estudio y el estudio de tránsito permiten hacer un análisis estadístico para determinar su relación con el diseño geométrico, para lo que se consideraron:

- Variación de los accidentes ocurridos por cada año de estudio.
- Número de accidentes según la gravedad.
- Tipología del accidente para determinar la causa que lo provocó.
- Determinación de la ruta que presenta mayor accidentalidad.
- Puntos de la vía donde ocurren los accidentes y la causa.
- Indicadores de accidentalidad por tramo y año, los cuales permitirán medir el peligro de la carretera en su estado de operación en el tramo de estudio.

Índice de peligrosidad para accidentes totales (I_{pat}). Relaciona el número total de accidentes registrados en un año con la cantidad de vehículos que circulan por un sector o tramo de vía específico, el cual se determina con la expresión:

$$I_{pat} = (10^6 \cdot N) / (TPD.365 \times L) \quad (1)$$

Índice de peligrosidad en accidentes con víctimas (I_{pav}). Relaciona el número de accidentes con víctimas registrados en un año con la cantidad de vehículos que circulan por un sector o tramo de vía específico.

$$I_{pav} = (108 \cdot N_v) / (TPD.365 \times L) \quad (2)$$

Índice de severidad (IS). Relaciona el número equivalente de accidentes de tránsito registrados en un año con la cantidad de vehículos que circulan por un sector o tramo de vía determinado.

$$IS = 10^8 ((9 \cdot AF) + (1,5 \cdot AS) + Asimp)) \quad (3)$$

Donde:

N: número de accidentes.

Nv: (número de accidentes con víctimas) = AF + AS.

AF: accidentes fatales.

AS: accidentes serios.

Asimp: accidentes simples.

TPD: tráfico promedio diario (veh./día).

L : longitud del tramo (km).

El porcentaje de cambio en la accidentalidad de un sitio se determina como:

$$\% \text{ de cambio} = 100 \cdot (\text{índice anterior} - \text{índice posterior}) / \text{índice anterior}$$

Se considera que un tramo es crítico si supera los siguientes valores:

$$I_{pat} \geq 1,8$$

$$I_{pav} \geq 1,0$$

$$IS \geq 8,0$$

Análisis de accidentalidad en la ruta de estudio

Con los datos de la información de la vía en el estado actual y el estudio de accidentalidad, se hizo la relación entre el diseño geométrico y la accidentalidad.

Análisis de características geométricas de la carretera en etapa de diseño

La ubicación del accidente en la vía permitirá determinar sobre el plano los principales elementos del diseño geométrico, como pendientes longitudinales, radios de curvas horizontales, anchos de calzada, curvas vertical, entre tangencias, peraltes, etc.

RESULTADOS

Determinación de la variación de la accidentalidad

Los accidentes en el 2010 y 2011 no presentaron una variación significativa, mientras que en el 2012 el número de accidentes registró un aumento del 20,6 % con respecto al año 2011 (figura 1).

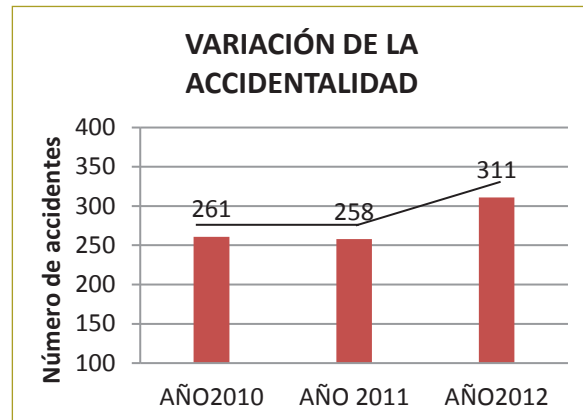


Figura 1. Variación de la accidentalidad en el periodo 2010-2012.

Determinación de número de accidentes con víctimas

Puede decirse que las cifras de accidentes con muertos y heridos en el periodo 2010-2012 no han cambiado y presentan una mínima reducción, según los datos suministrados por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y representados en la figura siguiente (figura 2), de la cual se puede identificar lo siguiente:

- En 2011 fallecieron seis personas, dos menos en accidentes de tránsito que en el 2010, lo que supone una reducción del 25 %; en cuanto al número de heridos graves en el 2011, hay una reducción del 13,43 % con respecto al año 2010; en accidentes con heridos leves se presenta una disminución del 15,06 %, mientras que en accidentes en sólo daños se registra un aumento del 16,9 % con respecto al año 2010.
- El número de accidentes con muertos pasó de seis en el 2011 a cuatro en el 2012, lo que presenta una disminución del 33,3 %; en accidentes con heridos graves se redujo de 58 a 33 accidentes con una disminución del 43,5 %; con respecto a heridos leves se refleja una disminución del 30,65 % en accidentes; los accidentes con sólo daños presentan un aumento del 76 % con respecto al año 2011.

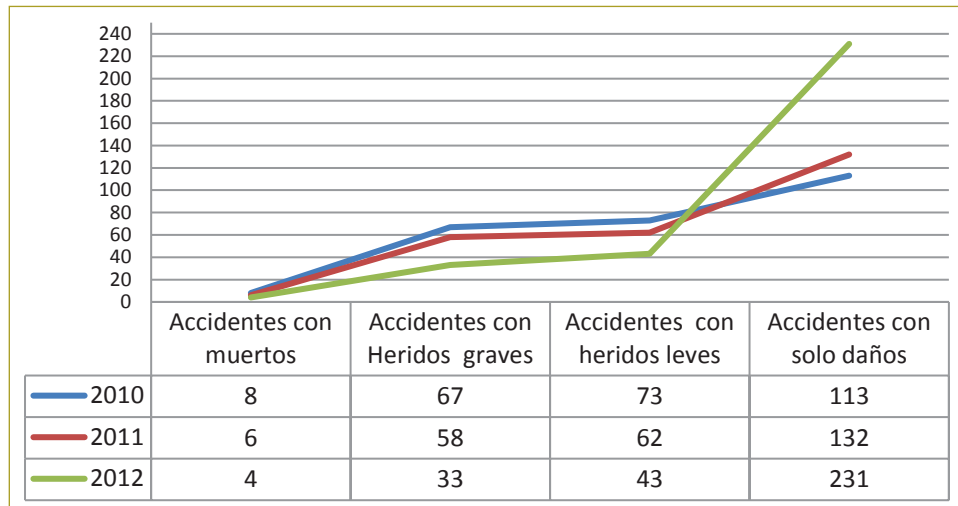


Figura 2. Número de accidentes con víctimas.

Tipología de los accidentes

Para identificar el tipo y causa de accidente se realizó el estudio correspondiente, con los datos suministrados.

Según el resultado de la figura siguiente (figura 3) se determina que la mayor causa de los accidentes es el factor humano (36 %), la segunda causa es el factor vehículo (29,71 %) y la tercera causa de accidente son otros factores (26,86 %).

Sentido de ruta de mayor accidentalidad

De acuerdo con los datos suministrados, entre los años 2010 y 2012 se identificaron 350 accidentes; la ruta de mayor accidentalidad es Bogotá-Puente Quetame con

457 accidentes, correspondiente a un 55,06 %, seguida por la ruta Puente Quetame - Bogotá con 373 accidentes, correspondiente a 44,94 % (figura 4).

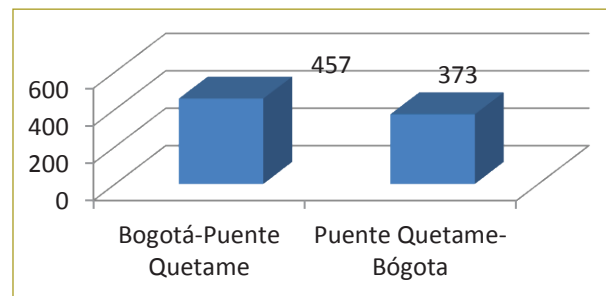


Figura 4. Ruta de mayor accidentalidad.

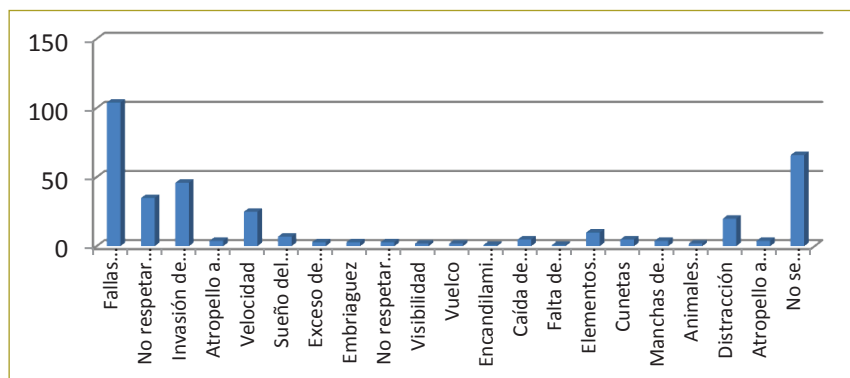


Figura 3. Tipología de los accidentes.

Accidentes con víctimas en el tramo de estudio

Los datos de accidentalidad en la ruta del PR4+000 (salida túnel Boquerón) al PR45+00 (peaje Puente Quetame) indican que los puntos de mayor accidentalidad están en la abscisa del PR19+00 al PR20+000. En el año 2010 hubo 11 accidentes, en 2011 17 accidentes y en el 2012 26 accidentes. El promedio de los accidentes ocurridos en los tres años de estudio es de 18, equivalente al 6,47 % de los accidentes presentados en los tres años.

El segundo punto con mayor accidentalidad está localizado entre el PR11+00 y el PR12+00. Los accidentes en este punto en el año 2010 fueron 16; en el 2011 se presentaron 14 accidentes y en el año 2012 fueron 21. El promedio de accidentes en los tres años es 17, con 6,11 % de los accidentes ocurridos en el periodo 2010 - 2012 (figura 5).

Cálculo de los indicadores de accidentalidad por tramo y año

Los indicadores de accidentalidad permitirán medir el peligro de la carretera en su estado de operación en el

tramo de estudio salida túnel de Boquerón al peaje de Puente Quetame, para determinar el sector crítico de la carretera en estudio (figura 6).

- Índice de peligrosidad para accidentes totales (Ipat). Se determinó con la expresión

$$Ipat = (10^6 \cdot N) / (TPD \cdot 365 \cdot L)$$

Según los resultados obtenidos se identifica que el tramo de estudio del Boquerón a Chipaque y Chipaque - Cáqueza presenta índices de peligrosidad altos, por lo que estos dos tramos se consideran críticos.

- Índice de peligrosidad en accidentes con víctimas (Ipav). De conformidad con la expresión

$$Ipav = (10^6 \cdot N_v) / (TPD \cdot 365 \cdot L) \quad (2)$$

Así mismo, se considera que el tramo de Chipaque PR12+300 a Cáqueza PR26+00 presenta los mayores índices de peligrosidad en los años de estudio, lo cual evidencia que es un punto crítico (figura 7).

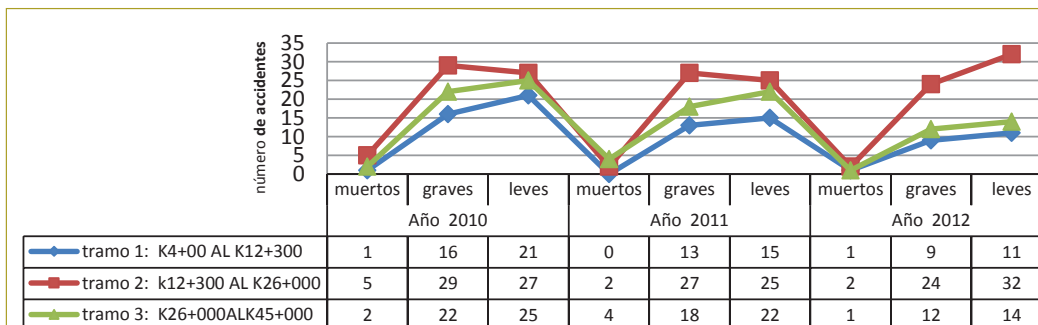


Figura 5. Número de accidentes con víctimas en el tramo de estudio.

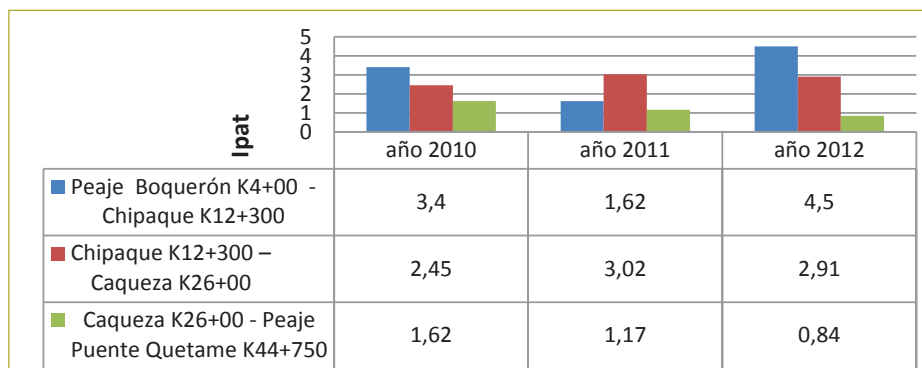


Figura 6. Índice de peligrosidad en accidentes totales por tramo.

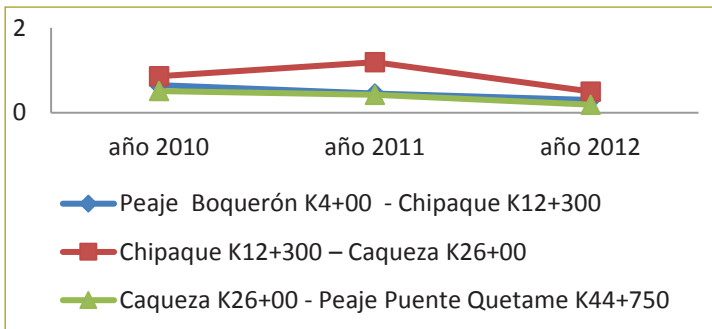


Figura 7. Índice de peligrosidad en accidentes con víctimas por tramo.

- Índice de severidad (IS). Permite relacionar, en el tramo de estudio, el número equivalente de accidentes de tránsito registrados en un año con la cantidad de vehículos que circulan por un sector; este estudio se realizó en todo el trayecto de estudio considerando los accidentes en ambos sentidos. El resultado obtenido indica que el tramo con índice de severidad más alto en todos los años es el de Chipaque-Cáqueza (figura 8).

$$IS = 10^6 ((9 \cdot AF) + (1,5 \cdot AS) + Asimp)$$

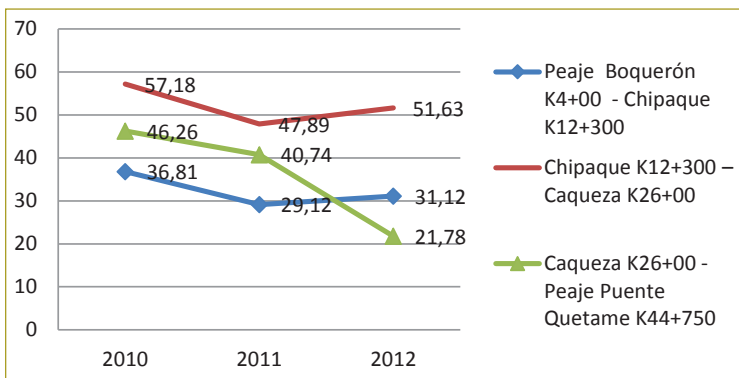


Figura 8. Índice de severidad por tramo.

ANÁLISIS DESCRIPTIVO DEL ESTADO ACTUAL DE LA CARRETERA BOGOTÁ-VILLAVICENCIO

En la ruta de estudio salida túnel Boquerón PR4+100 hasta el peaje de Puente Quetame PR45+00 se inspeccionó la infraestructura de la vía para determinar la amenaza de accidentalidad por defectos del diseño geométrico, estructuras al borde de la calzada, señalización, intersecciones y el entorno en la zona de influencia que pueden contribuir a la accidentalidad.

Los factores analizados en la etapa actual de la vía son:

- Diseño geométrico: ancho de calzadas y carriles, bermas, cunetas, velocidad del proyecto, características de los alineamientos y accesos a la vía.
- Señalización: horizontal y vertical.
- Elementos peligrosos al borde de la vía.
- Cruces y pasos por poblaciones.

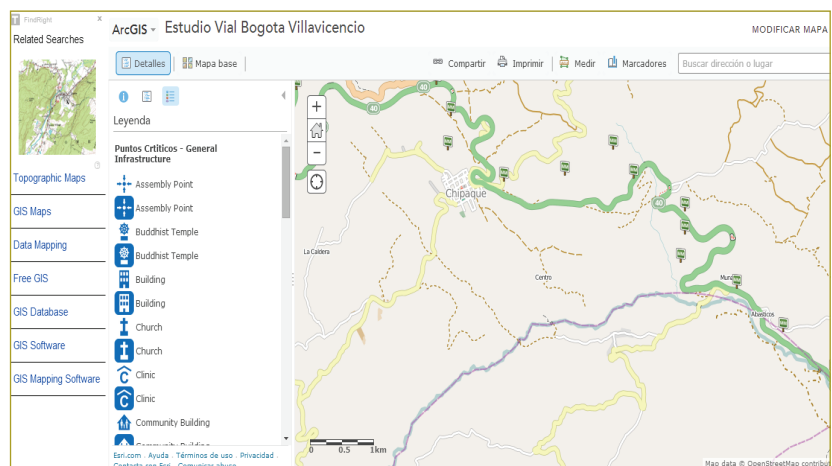
Aplicando la metodología IRAP para el registro y estado actual de la vía, se trabajó con la plataforma de Google – ArcGis, en los cuales los datos se encuentran registrados en el *link*

<http://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=ba3e895c2cd7465ea2679c87fd1b87e3>.

Con los datos obtenidos en campo de coordenadas y registro fotográfico se trabajó en la plataforma, cuyo resultado es el siguiente:

Mapa de Google Maps de la zona de estudio. El registro fotográfico se hizo cada kilómetro (figura 9).

Figura 9. Ruta de estudio con registro de imágenes cada kilómetro.



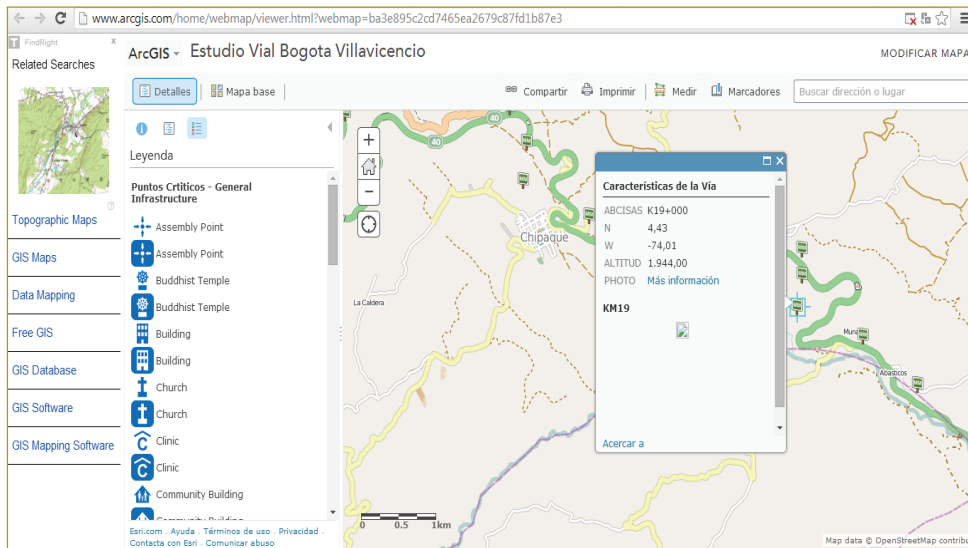


Figura 10. Características de los puntos en la vía.

El análisis del tramo de estudio está relacionado con la fotografía actual, donde se incluyen datos de abscisa, coordenadas, altitud y características del punto con su fotografía (figura 11).



Figura 11. Fotografía de punto crítico.

El análisis de las características de los puntos de las vías se utiliza para detallar la infraestructura existente y hacer mediciones.

La geometría actual de la vía tiene un corte transversal en la mayor parte de su recorrido, como se puede apreciar en la figura siguiente (figura 12).

Se considera que la mayor parte de los tramos presenta puntos peligrosos debido a:

- *Acesos no controlados.* El riesgo de accidente es alto por entrecruzamiento de vehículos, choques laterales y traseros, entre otros.
- *Acesos en curvas.* Elevado riesgo de accidentalidad por falta de visibilidad y velocidades demarcadas de 70 km/hora.
- *Carriles de aceleración y de desaceleración.* No se encuentran en los tramos de pendientes altas y en los

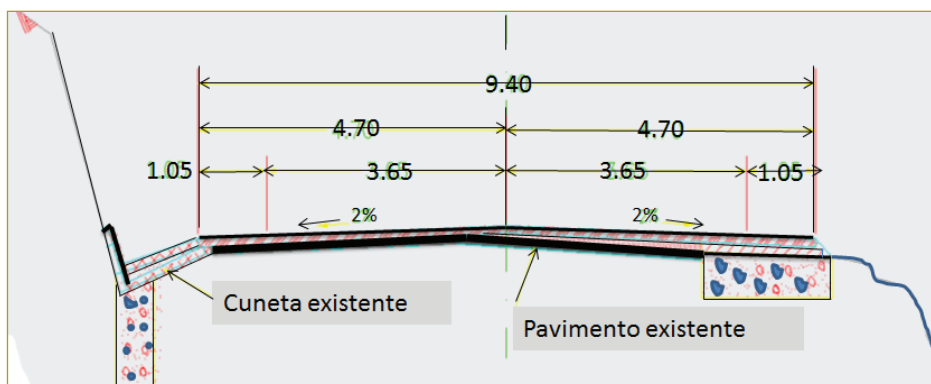


Figura 12. Corte transversal en vía existente.

Fuente: Coviandes.

puntos de acceso, aumentando la probabilidad de accidentalidad por ser una vía de una sola calzada.

- Se presentan curvas con radios cortos e igualmente con poca visibilidad, debido a taludes de corte muy cercanos a la calzada.
- Hay variaciones de velocidad en algunos tramos, donde se pasa de curvas de radios muy cortos a curvas de radios amplios.
- Las curvas no presentan sobreancho, por lo que hay problemas de invasión de carril por parte de vehículos pesados.
- Se registra variación en los anchos de carril en el tramo Villavicencio-Bogotá, donde se pasa del carril interno de 3,40 m al carril externo de 3,50 y va bajando de 3,65 m.
- La señalización vertical presenta confusiones en cruces y desvíos a la izquierda, sin carril de desaceleración.
- Señalización elevada. En el *Manual de diseño geométrico* (2008) del Invías se indica que las señales SI-06 deben mostrar máximo tres localidades y en muchas de éstas se muestran hasta cuatro localidades.

A continuación se aprecian elementos peligrosos a borde de carretera sin ningún tipo de señalización (figura 13).



Figura 13. Elementos peligrosos a borde de carretera.

ANÁLISIS DEL DISEÑO GEOMÉTRICO EN ETAPA DE DISEÑO

El diseño geométrico de una carretera debe cumplir con normativa y parámetros de seguridad para minimizar los riesgos de accidentalidad ante el factor de infraestructura.

El elemento principal para la movilidad es la infraestructura vial, la cual debe considerar el uso de los

terrenos y la planificación de la red, para garantizar al usuario de la vía salvar su vida en caso de un error humano, o evitar accidentes por inconsistencias en el diseño.

Para su revisión se contemplaron las consideraciones del *Manual de diseño geométrico* del Instituto Nacional de Vías (Invías, 2008).

El análisis geométrico del proyecto en etapa de diseño se hizo con planos en medio magnético, informe de diseño geométrico suministrado por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y documentos del estudio de la ruta que entregó la Corporación Fondo Nacional de Prevención Vial.

El tramo de estudio fue del K34+100 al K45+00, como corresponde a los siguientes sectores:

- Sector 1: El Tablón - Puente Téllez.
- Sector 1 A: Puente Téllez - Puente Quetame.
- Sector 2: Puente Quetame.

En la figura siguiente se indica el tramo de estudio del proyecto en etapa de diseño de la doble calzada Bogotá-Villavicencio. Paralelo a éste se presentan diseños de accesos, desvíos y retornos, en los cuales se hace el análisis de algunos parámetros de diseño de éstos.



Figura 14. Tramo de estudio.

Fuente: Agencia Nacional de Infraestructura.

Las características actuales de la carretera están contempladas más adelante (cuadro 1).

Las condiciones generales encontradas en el diseño son:

- El diseño geométrico cumple las especificaciones de velocidad dadas en el diseño.

Cuadro 1

Especificaciones de carretera de doble calzada

Especificaciones	Unidad	Vía nueva
Velocidad	km/h	80
Ancho de vía	M	10,9
Pendiente máxima	%	4,5
Proporción zonas de no paso	%	0
Ancho del corredor vial	M	200
Radio mínimo	M	240
Puentes	und.	41
Intersecciones principales		A desnivel
Control de accesos		Sí

Fuente: Coviandes. Informe doble calzada Bogotá-Villavicencio.

- Los retornos identificados en el tramo de los radios de curvatura y anchos de carril cumplen con lo estipulado en el *Manual de diseño*.
- En los carriles de divergencia se deben verificar los anchos de carril para dar continuidad con los anchos

de los carriles de la calzada, según lo estipulado en el *Manual de diseño*.

- El tramo no cuenta con zonas despejadas o zonas de servicio, de acuerdo con la guía de diseño de zonas laterales.
- La rasante está ubicada sobre terraplenes y pendientes de talud 1:3, siendo traspasables.
- Los carriles de aceleración y desaceleración se presentan en longitudes cortas, por lo que no cumplen con lo indicado en el *Manual de diseño geométrico* del Inviás.
- Se deben considerar los diseños de las cunetas con criterios de seguridad y que sean traspasables.

Uno de los ejemplos encontrados es el diseño del PR37+100.

Los taludes de corte se pueden evidenciar en los PR K36+555 K36+690, K36+680 V:1, H:1, K36+750 K36+820 V:1, H:0.5; K36+870 K37+030 V:1, H:0.5.

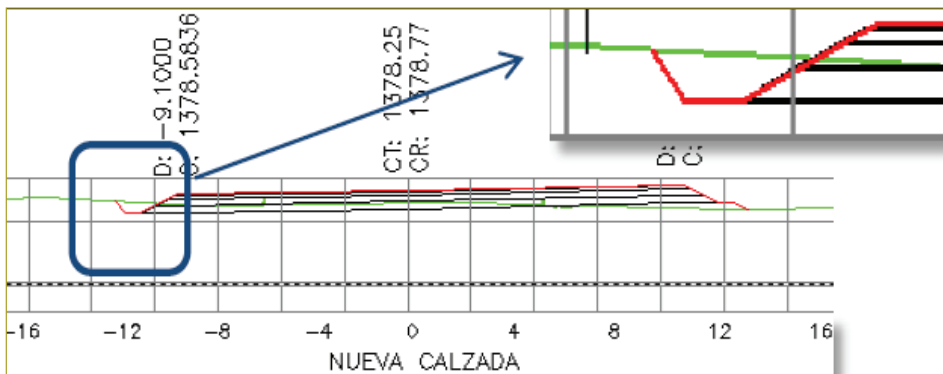


Figura 15. Diseño de cunetas de drenaje.

Fuente: Documento de la Corporación Fondo de Prevención Vial.

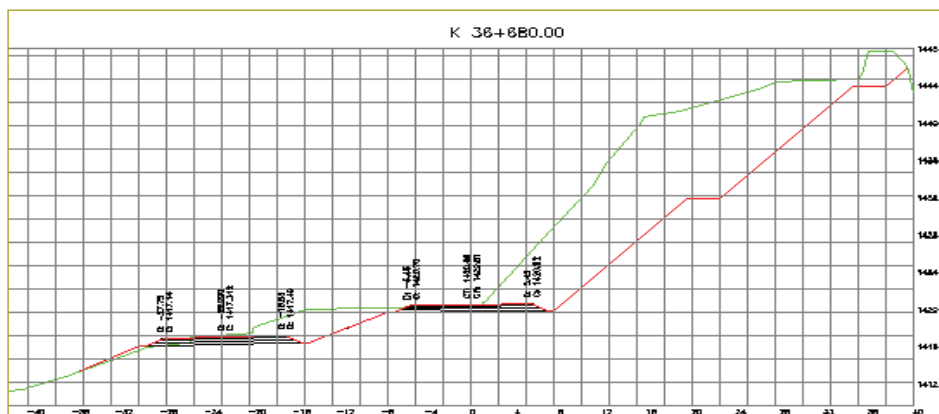


Figura 16. Taludes de corte sin criterio de seguridad vial.

CONCLUSIONES

- La carretera nacional Bogotá-Villavicencio, identificada como la ruta 40 en el tramo de estudio comprendido entre PR4+100 y PR45+00, es una vía de una sola calzada, con tránsito bidireccional y con un TPD >5000, lo que aumenta el riesgo de accidente choque frontal por invasión del carril contrario.
- La vía cuenta con una gran cantidad de accesos directos en los dos sentidos a negocios al borde de la carretera, viviendas e intersecciones con vías veredales, los cuales carecen de carriles de aceleración y de desaceleración, convirtiéndose en puntos potenciales de accidentalidad debido al entrecruzamiento de vehículos, falta de visibilidad, disminución de velocidad, pendientes fuertes y maniobras peligrosas que deben hacer los conductores.
- La vía actual presenta inconsistencias, ya que hay curvas de radio pequeño localizadas a corta distancia de la finalización de curvas de radio grande.
- La presencia de elementos peligrosos en las zonas laterales de la vía en todo el recorrido aumenta la probabilidad de accidentes. Es recomendable que algunos de éstos se puedan remover, y otros se puedan señalar o proteger con sistemas de redireccionamiento y contención técnicamente diseñados y colocados para que actúen con eficacia.
- La accidentalidad ha presentado un registro total de 830 accidentes en el periodo 2010-2012, con un promedio de 276,66 accidentes por año.
- El tramo crítico de accidentalidad está entre Chipaque y Cáqueza en el sentido Bogotá-Villavicencio, el cual presenta los datos de accidentalidad más altos con muertos y muestra igualmente los mayores indicadores de accidentalidad, por lo cual se considera un tramo de alto riesgo de accidente. Esto concuerda con las características de la vía por ser un tramo conflictivo por pasos peatonales, problemas de señalización, accesos no señalizados o controlados, curvas con velocidades altas y continuas, curvas con radios grandes, pendientes fuertes, poca visibilidad, tramos de radios y entre tangencias cortas, taludes y estacionamiento al lado de la vía.
- Es necesario mejorar la señalización en los puntos críticos, hacer controles periódicos de velocidad y realizar el mapa de velocidades para identificar la consistencia de las señales SR-30.
- La tipología del accidente de mayor incidencia es el factor humano, donde no respetar las señales de tránsito, invadir el carril contrario y conducir a alta velocidad son los que muestran más ocurrencias al transitar por esta ruta. Una causa de esto se identifica por el tipo de vía, ya que los vehículos de carga invaden el carril contrario en los puntos de curva donde no se presentan sobrecanchos por ser una vía bidireccional, sin separador central.
- De acuerdo con los datos analizados se presenta un porcentaje alto de accidentes en los cuales no se identifica la causa, razón por la cual no se puede obtener un análisis preciso sobre éstos para implementar acciones de mejora. Es necesario que las bases de datos de los registros de accidentalidad sean unificados, debido a que las entidades presentan resultados diferentes.
- La geometría de la ruta en etapa de diseño en los tramos estudiados presenta riesgos de accidentalidad en cuanto a los taludes de corte empinados, los cuales se deben diseñar con criterios de seguridad para que los vehículos sean encauzados nuevamente en el momento de un accidente.
- En el diseño se observan cunetas al lado de las bermas, las cuales se deben construir con criterio de seguridad considerando la posibilidad de reemplazar las triangulares por las trapezoidales (*Roadside Design Guide*).
- En cuanto al diseño geométrico, la vía está diseñada con arreglos espiral-circular-espiral, lo que minimiza las longitudes de entre tangencia.
- En los diseños transversales no se identifican zonas despejadas ni zonas de servicios para la instalación de señalización, ductos y postes de SOS.
- Los accesos y retornos en algunos puntos se presentan entre cruzamientos y disminución de velocidad, siendo riesgos de accidentalidad.
- Lo expuesto en el presente documento pone de manifiesto la importancia de evaluar la relación que tiene el diseño geométrico en la accidentalidad de una carretera, considerando para los nuevos proyectos de infraestructura vial factores que minimicen el riesgo de accidente y aplicar manuales para hacer vías con infraestructura segura.
- El actual estudio explica desde la ingeniería de tránsito y el diseño geométrico los estudios necesarios para determinar los puntos críticos de una vía antes

de entrar en etapa de operación y así realizar los ajustes necesarios a los diseños.

REFERENCIAS

1. Cal y Mayor, R. & Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones* (8.ª ed.). Ciudad de México, México: Omega.
2. Cárdenas Grisales, J. (2005). *Diseño geométrico de carreteras*. Bogotá: Ecoe.
3. Cardoso, J. L., Stefan, C., Elvik, R. & Sørensen, M. Road Safety Inspections: best practice and implementation plan. [Consultado el 15 de julio de 2013]. Disponible en internet: <http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/ripcord_d05_road_safety_inspections.pdf>.
4. Conferencia Diseño geométrico de vías y la seguridad vial. Mayo 6 al 11 y de Junio 17 al 22 de 2013. Cali: Universidad del Valle. Ciudad Universitaria Meléndez.
5. Dourthé Castrillón, A. & Salamanca Candia, J. (marzo de 2003). *Guía para realizar una auditoría de seguridad vial*. Chile.
6. Flórez, C. F., Reyes, F. A., Giraldo, L., Bernal, O. H., & Quintana, L. A. Incidencia de las características geométricas y de tránsito de vías en alta montaña y de bajas especificaciones geométricas sobre la accidentalidad "Caso Plan 2500: Departamento del Quindío".
7. HOF Consultores SAS (2012). Guía técnica para el diseño de las zonas laterales, para vías más seguras. Bogotá: Fondo de Prevención Vial.
8. Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses (2013). Accidentes de tránsito: segunda causa de muerte violenta en el año 2012. Bogotá, D.C. [Consultado el 17 de junio de 2013]. Disponible en internet <http://www.medicinalegal.gov.co/index.php/component/search/accide?searchphrase=any&ordering=newest&limit=50&lang=es>.
9. Karlaftis, M. & Golias, L. Effects of road geometry and traffic volumes on rural roadway accidents rates. *Revista Accident Analysis and Prevention*, N.º 34, pp. 357-365. [Consultado el 25 de junio de 2013]. Disponible en internet: <http://users.ntua.gr/igolias/papers/paper_33.pdf>.
10. Kuratorium für verkehrssicherheit KFV (2007). Mejores Prácticas de Seguridad Vial. [Consultado el 25 de junio de 2013]. Disponible en internet: http://ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/publications/supreme_c_es.pdf.
11. *Manual de señalización vial* (2004) [Consultado el 11 de julio de 2013]. Disponible en Internet: http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portallG/home_1/recursos/01_general/documentos/27102008/manual_senalizacion.pdf.
12. *Manual de auditorías en seguridad vial* (2005) [Consultado el 11 de julio de 2013]. <Disponible en internet: <http://transito.worldtrainingcolombia.com/pdf/MASV.pdf>>.
13. Mendoza Díaz, A., Pérez Abarca, E. & Centeno Saad, A. G. (2009). Auditorías de seguridad vial de carreteras en operación, RII. vol. 10, N.º 2, pp. 137-134. ISSN 405-7743 FI-UNAM.
14. Ministerio de Transporte de Colombia (2008). *Manual de diseño geométrico* [Consultado el 11 de julio de 2013]. Disponible en internet: http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portallG/home_1/recursos/informacion_institucional/20122007/documento_tecnico.jsp.
15. Omgetec S.A. Carretera Bogotá - Villaviencio. [Consultado el 15 de julio de 2013]. Disponible en <http://www.ingetec.com.co/experiencia/textos-proyectos/vias/carretera-bogota-villavicencio.htm>.
16. Piarc (2007). *Manual de inspección de seguridad vial en carreteras existentes*.

Elementos convencionales y no convencionales para la captación del drenaje urbano de aguas lluvias

Conventional and non-conventional elements for rainwater urban drainage catchment

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹ - LEIDY JOHANNA FRANCO CALDERÓN²

1. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito/Centro de Estudios Hidráulicos/Profesor titular.

2. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito/Centro de Estudios Hidráulicos/Maestría en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - leidy.franco-c@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 14/04/2016 Aceptado: 26/08/2016

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

Resumen

El objetivo principal de un sistema de drenaje urbano es permitir el paso seguro de los peatones y los vehículos, lo cual se logra evacuando la escorrentía con rapidez para evitar inundaciones; no obstante, el desarrollo de las ciudades ha modificado el ciclo hidrológico natural al aportar gran cantidad de contaminantes a las corrientes superficiales que reciben el agua lluvia del sistema urbano. Por estas razones se han creado sistemas de aguas lluvias no convencionales, acordes con el desarrollo sostenible, denominados sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

En virtud de que el sistema de drenaje urbano comienza con la captación en el sitio de origen de la escorrentía, en este artículo se plantea el estudio de los elementos convencionales y no convencionales para la captación de aguas lluvias, al tiempo que se establecen criterios generales de selección y diseño, y la clasificación de los SUDS.

Palabras claves: drenaje urbano, sumideros, cunetas, sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

Abstract

The main objective of urban drainage system is to allow safe passage for pedestrians and vehicles quickly evacuating runoff to prevent flooding. However, the development of cities has altered the natural water cycle and provided wide range of contaminants to surface water streams receiving rain from urban systems. For these reasons we have developed unconventional rainwater systems in accordance with sustainable development, called sustainable urban drainage systems (SUDS).

Considering that urban drainage system begins with the collection on the site of origin of runoff, in this article the study of conventional and unconventional elements for capturing rainwater arises, establishing the general criteria for selection, design, and classification of SUDS.

Keywords: urban drainage; drains; ditches; sustainable urban drainage systems (SUDS).

INTRODUCCIÓN

En un sistema convencional de drenaje urbano, el transporte, la captación y la entrega del agua lluvia al afluente están compuestos por la vía, las cunetas o canales, las entradas (sumideros, especialmente) y los colectores. El principal objetivo de este sistema es permitir el paso seguro de los vehículos y los peatones, evacuando lo antes posible y de manera específica la escorrentía generada por un evento con recurrencia igual a la del periodo de diseño.

El crecimiento de las ciudades y, por ende, el desarrollo urbano no contemplado hacen que los sistemas de drenaje convencional o tradicional sean insuficientes. Además, como se adicionan más zonas impermeables que cambian significativamente el ciclo del agua se reduce la infiltración, lo que hace que la precipitación se convierta, en su mayoría, en escorrentía superficial, la cual se concentra con rapidez. De acuerdo con estas consideraciones, el agua pluvial que recibe el sistema de drenaje actual sobrepasa su capacidad y, por consiguiente, ocasiona inundaciones y desbordamientos en el casco urbano [1].

Los diseños y las captaciones convencionales dirigen el agua lluvia al sistema de drenaje pluvial de manera concentrada y, por lo regular, no permiten su aprovechamiento.

ANTECEDENTES

En la bibliografía sobre drenaje no convencional se mencionan los problemas de calidad del agua lluvia en los sistemas tradicionales. Las actividades humanas generan gran cantidad de contaminantes, como sedimentos, aceites, granos, metales, fertilizantes, pesticidas, sales, patógenos y basura, que afectan la salud pública y causan daño ambiental. Esta contaminación tiene diversos orígenes –razón por la cual se habla de contaminación difusa–, aspecto que dificulta su cuantificación y calificación. Durante la precipitación, los residuos acumulados en la superficie en tiempo seco son arrastrados hasta las captaciones, generando problemas de contaminación en los afluentes y colmatación de las captaciones [2].

Para mejorar los problemas asociados con el drenaje urbano convencional y proponer soluciones novedosas se vienen introduciendo sistemas de aguas lluvias no convencionales, acordes con el desarrollo sostenible. De

este modo, han surgido lo que podría denominarse sistemas no convencionales de drenaje urbano, conocidos como sistemas de drenaje sostenible (*sustainable urban drainage systems*, SUDS), desarrollo de bajo impacto (*low impact development*, LID), diseño urbano sensible al agua (*water sensitive urban design*, WSUD), mejores prácticas de gestión (*best management practices*, BMP), entre otros. En la bibliografía de habla hispana se conocen comúnmente como sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

De acuerdo con las definiciones encontradas, estos sistemas buscan especialmente no interferir en el ciclo del agua previo a la urbanización, para mitigar los problemas asociados al drenaje urbano convencional, evacuando de manera espacial la escorrentía generada por un evento con recurrencia igual a la del periodo de diseño, minimizando los impactos en el desarrollo urbanístico y maximizando la integración paisajística, al igual que los valores sociales y ambientales. Además, estos sistemas proponen considerar el agua lluvia como un recurso, con el fin de darle un manejo más eficiente y aprovecharla para su reutilización o infiltración al subsuelo, lo cual garantiza un sistema más eficaz y sostenible [3].

CAPTACIONES DE DRENAJE URBANO

• Captaciones convencionales

En un sistema de drenaje convencional, la captación de la escorrentía superficial se hace a través de las vías o cunetas, las cuales transportan el agua lluvia hasta las estructuras de captación llamadas sumideros. Las cunetas y los sumideros conforman las estructuras convencionales necesarias para la captación de la escorrentía superficial.

• Captaciones no convencionales

Son estructuras alternativas en el sistema de drenaje urbano para captar la escorrentía superficial, guiadas por el drenaje sostenible. Para determinar las estructuras de captación no convencionales, se requiere conocer las que utilizan los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) para garantizar el manejo adecuado de la escorrentía y establecer cuáles cumplen la función de captación de la escorrentía superficial.

SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS)

Debido a que los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) son prácticas relativamente nuevas y con múltiples funciones, aún no se ha homogeneizado ninguna clasificación.

De conformidad con la recopilación bibliográfica se propone la siguiente clasificación (figura 1), en la que las estructuras se presentan de acuerdo con la función que cumplen en el manejo de la escorrentía del drenaje urbano. Esta clasificación facilita la selección adecuada de las estructuras SUDS para cada caso en particular.

En la clasificación propuesta, las estructuras de captación y transporte del agua de escorrentía en zonas urbanas son las siguientes: superficies permeables; pozos de infiltración; zanjas de infiltración, filtración

y biofiltros; cunetas verdes; franjas filtrantes y redes troncales.

CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO. CAPTACIONES CONVENCIONALES

El diseño de un sistema de drenaje en una calle es una tarea compleja, que se logra generalmente por un proceso iterativo de ensayo y error.

El diseño de un sistema de drenaje en una calle es una tarea compleja, que se consigue por lo regular mediante un proceso iterativo de ensayo y error. Se inicia con la estimación de la capacidad de transporte de aguas lluvias en dicha vía, la cual provee una base para diseñar los sumideros a lo largo del trayecto. La capacidad hidráulica de la calle está determinada por su clasificación y por los parámetros de corte transversal, como la pendiente transversal de la vía, la dureza de la superficie, la amplitud de la cuneta, etc.

Después de definir la capacidad hidráulica, se establece la ubicación de los sumideros. Para diseñar un sistema de drenaje en la vía se deben seguir estos pasos [4]:

1. Preparar un plano completo del proyecto en un plano topográfico. El diseño debe incluir calles de circulación de carros, lotes de parqueo, detención de estanques de almacenamiento, etc.
2. Identificar la clasificación de las calles.
3. Seleccionar la frecuencia de diseño del sistema de drenaje (tormenta).
4. Determinar la capacidad conveniente de agua lluvia de la vía con el criterio del máximo esparcimiento de agua permitido, la profundidad del flujo de la cuneta (Q_s) y la seguridad sobre la vía.
5. Ubicar y diseñar los sumideros a lo largo de la calle.

Los sumideros se clasifican en sumideros en pendiente y sumideros en puntos bajos, y su diseño depende de su ubicación. Los primeros están diseñados para recolectar entre el 70 y el 85 % del flujo de la cuneta, en tanto que el agua lluvia restante se lleva a los sumideros aguas abajo.

En un sistema de entrada de calle, el diseño de los sumideros individuales depende de las siguientes consideraciones:

1. Predecir el caudal de diseño (Q_p) producido por el área de drenaje entre el sumidero aguas arriba y el sumidero bajo diseño.

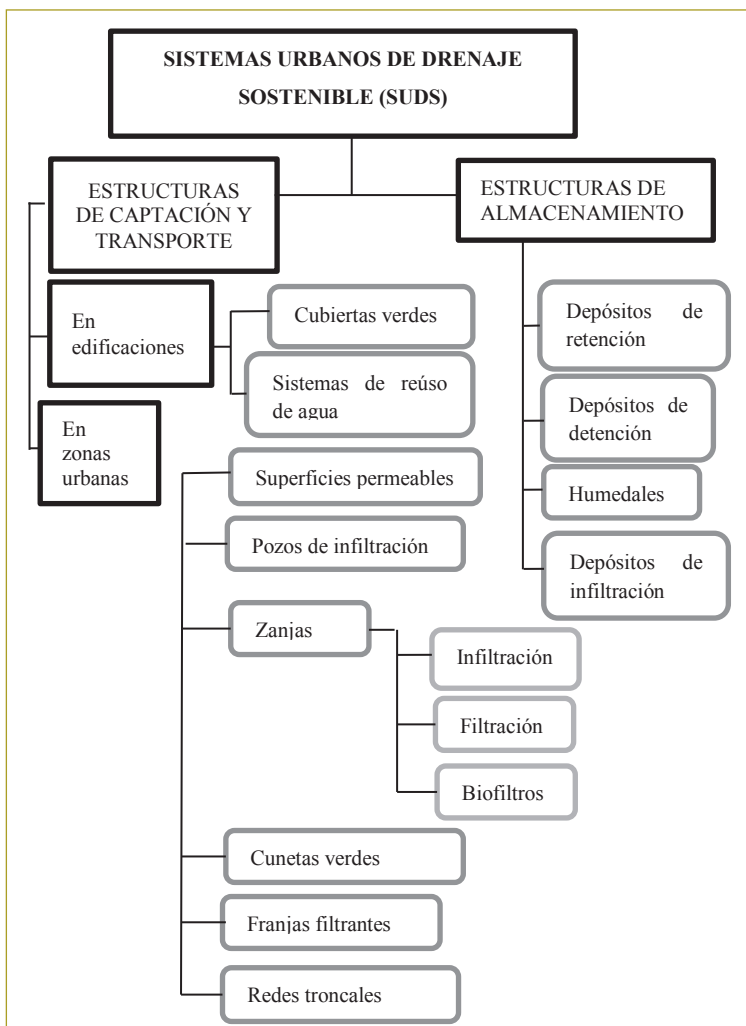


Figura 1. Clasificación propuesta de las estructuras SUDS.

Fuente: Propuesta de los autores.

2. Verificar si el caudal de diseño (Q_p) viola alguna necesidad de diseño, como el esparcimiento del agua, la profundidad en la cuneta y la velocidad máxima permitida de la corriente, es decir, la capacidad máxima de la vía.
3. Clasificar el sumidero con un factor de obstrucción razonable.
4. Calcular el flujo de arrastre (flujo no captado por el sumidero) para el sumidero aguas abajo.
5. Considerar la interdependencia entre los parámetros diseñados, como la ubicación del sumidero, el área de drenaje, el caudal pico y la profundidad de la cuneta (figura 2).

CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO. ESTRUCTURAS SUDS

Para el diseño hidráulico de las estructuras SUDS se deben tener en cuenta las características de la cuenca, como calidad del agua, morfología del sitio y criterios hidrológicos.

Una vez identificadas tales características, se puede determinar si es posible la infiltración en el suelo, ya sea parcial o total. Si es total, se diseña un sistema que incluya la infiltración de la escorrentía, pero si es parcial deben identificarse las áreas donde la escorrentía pueda infiltrarse; si esto no es posible, hay que modificar las estructuras con subdrenajes que transporten la escorrentía hacia otras estructuras aguas abajo. Con la información base del sitio se procede a seleccionar la estructura; como ya se mencionó, existen diferentes tipos de estructuras SUDS, pero se seleccionan de acuerdo con los siguientes criterios generales, establecidos con base en la información recopilada y el análisis de ésta: características del sitio, función de la estructura, evento de escorrentía y tipo de tratamiento del agua lluvia. Una vez seleccionado el tipo de estructura más conveniente se debe calcular su capacidad hidráulica, cuyos criterios de diseño se presentan en la página siguiente (figura 3).

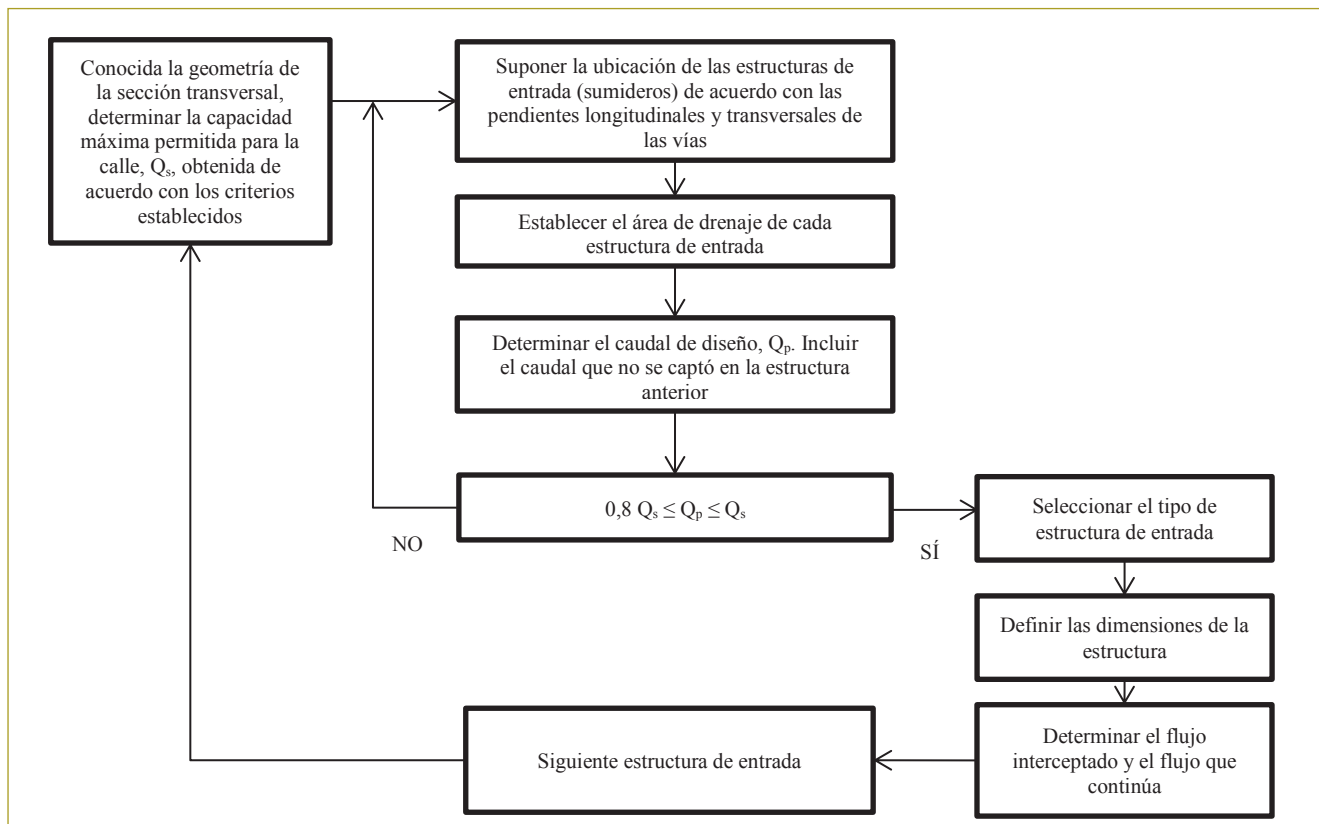


Figura 2. Diagrama de flujo para el diseño del drenaje urbano.

Fuente: [4].

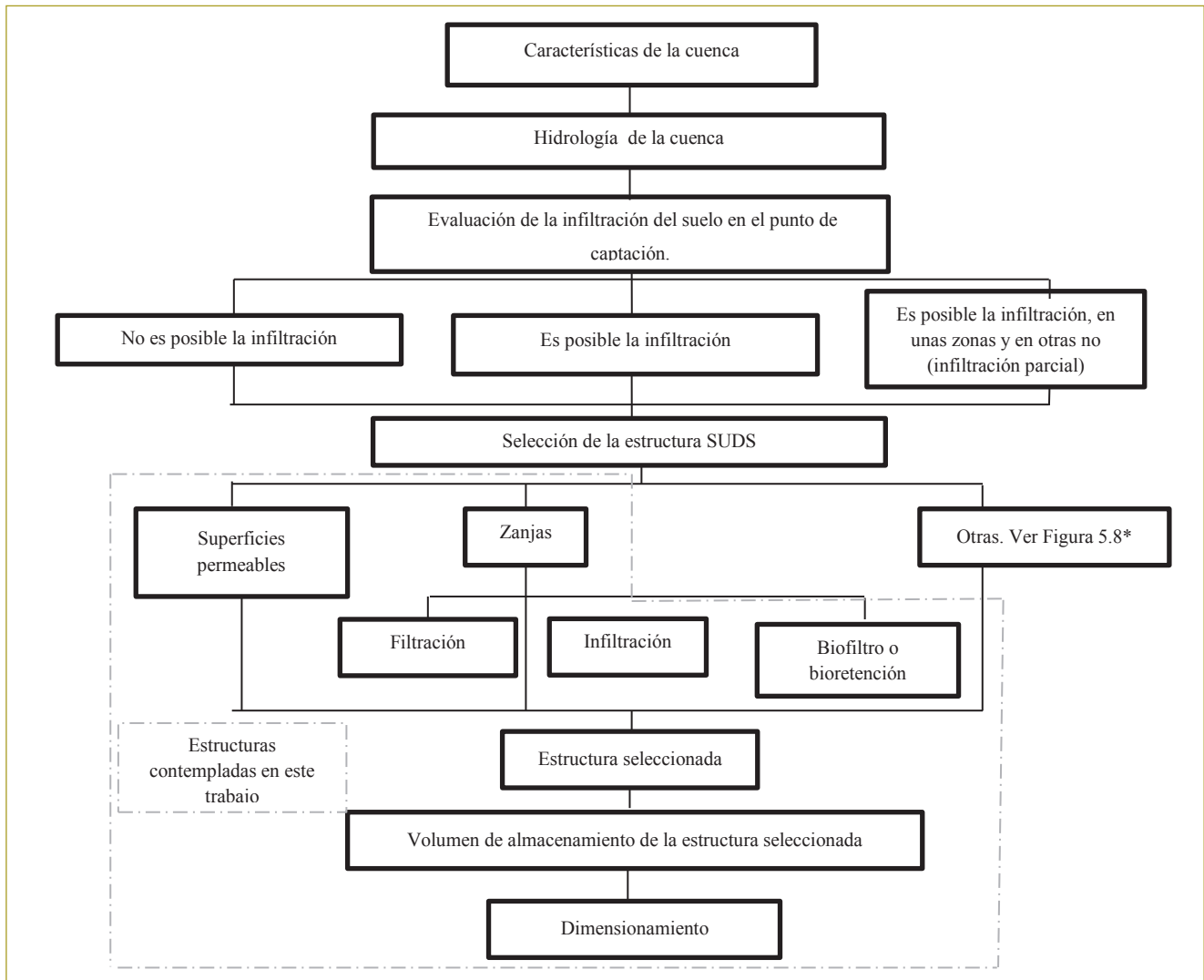


Figura 3. Criterios generales de diseño de estructuras SUDS.

Fuente: Propuesta de los autores.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En la etapa de diseño de las estructuras de drenaje urbano convencional se evalúan características como la clase de vía, la sección transversal, las pendientes transversal y longitudinal y el tipo de superficie. Con estas características se calcula la capacidad máxima de la vía para el transporte de la escorrentía, teniendo en cuenta la seguridad de los vehículos y los peatones; después se procede a ubicar las estructuras de captación convencionales (sumideros), que captan rápidamente la escorrentía de la vía para transportarla al sistema de drenaje urbano.

Las estructuras convencionales están diseñadas para captar en forma específica y en el menor tiempo posible la escorrentía urbana sobre las vías. Sin embargo, en la

actualidad hay nuevos retos respecto al drenaje urbano, porque el acelerado desarrollo de las ciudades impacta negativamente el ciclo del agua, razón por la cual se hace necesario implementar un sistema de drenaje que no sólo capte de manera concreta y eficaz la escorrentía de las vías, sino que contemple además el tratamiento y la captación espacial de la escorrentía.

De este modo, se plantea el estudio de captaciones de aguas lluvias mediante estructuras no convencionales, denominadas sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), las cuales están diseñadas para el almacenamiento temporal y el tratamiento de las aguas lluvias a través de la filtración o la infiltración, reduciendo la contaminación y amortiguando el caudal pico.

Las estructuras de captación no convencionales estudiadas no están diseñadas para captar inmediatamente la escorrentía ni para la capacidad máxima de la vía, sino para el almacenamiento temporal y el tratamiento de la escorrentía, removiendo sólo un porcentaje de los contaminantes.

Esto significa que las estructuras convencionales y las no convencionales se podrían complementar, ya que tienen funciones y objetivos diferentes dentro del sistema de drenaje urbano. Las convencionales drenan rápidamente la escorrentía de la vía, mientras que las no convencionales almacenan en forma temporal la escorrentía, para evacuarla controladamente luego del evento; además, hacen un tratamiento para eliminar un porcentaje de los contaminantes.

Aunque en algunas ocasiones la palabra *convencional* hace referencia a metodologías obsoletas, de acuerdo con la investigación realizada, en este caso no lo es.

2. Para el estudio de las estructuras de captación no convencional de drenaje urbano hubo que identificar las que conforman los sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS).

En la bibliografía consultada, todas las clasificaciones propuestas son diferentes. Algunas presentan únicamente el total de las estructuras que conforman los SUDS, sin ninguna clasificación; otras las clasifican por el tipo de tratamiento usado, y otras más combinan el tipo de tratamiento utilizado y la función que cumple la estructura dentro del sistema.

Uno de los objetivos de este estudio es proponer un criterio de selección de la estructura de captación adecuada para cada caso. Teniendo en cuenta esto, se clasificaron los SUDS según la función que cumple la estructura en el sistema de drenaje urbano. Por tal razón, la clasificación propuesta simplifica la selección de la estructura de captación.

3. En el sistema de drenaje urbano implementado para Colombia el mantenimiento de las estructuras es un tema clave para las ciudades, puesto que en éstas no se practica el cuidado sino la reparación. Por tal motivo, la inclusión de este tipo de sistemas requiere que los

diseñadores, los constructores, el personal operativo y la comunidad tomen conciencia de la importancia de implementar este tipo de estructuras de captación para mitigar los efectos producidos por el desarrollo urbano en el ciclo del agua.

Además, la normativa colombiana respecto a este tipo de estructuras es nula; simplemente se sugiere su utilización, pero sin regular el diseño, la construcción y el mantenimiento, lo cual dificulta su implementación.

Las estructuras SUDS requieren inversiones iniciales costosas y un riguroso mantenimiento para prolongar su vida útil; no obstante, su implementación posibilita que las demás estructuras y procesos aguas abajo del sistema de drenaje se optimicen, debido a la reducción del caudal pico y al tratamiento de las aguas lluvias.

Las estructuras no convencionales son un atractivo en urbanizaciones privadas, si se presentan como proyectos amigables con el medio ambiente; sin embargo, cabe aclarar que los costos iniciales para su implementación son altos, así como su mantenimiento.

REFERENCIAS

- [1] Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. (2011). Secretaría Distrital del Ambiente. Subdirección de Ecorbanismo y Gestión Ambiental Empresarial (Segae). Sistemas urbanos de desarrollo sostenible. Documento técnico de soporte SUDS [en línea]. <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/73754/Sistema+Urbanos+de+Drenaje+Sostenible>.
- [2] Ciria C697 (2001). *The SUDS manual*. Londres: s.n.
- [3] Perales Momparler, S. (s.f.). Sistemas urbanos de drenaje sostenible SUDS [en línea]. <http://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/3358-P3-Sara%20PeralesACC.pdf>.
- [4] Rodríguez, A. (2013). *Drenaje urbano: elementos de diseño. Drenaje urbano no convencional*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- [5]. Guo, J.C.Y. (1997). *Street Hydraulics and Inlet Sizing*. Colorado, USA: Water Resources Publications, LLC.
- [6] Urban Storm Drainage and Flood Control District Denver, Colorado (2001). *Urban Storm Drainage Criteria Manual*, vol. 1.
- [7] Virginia Department of Environmental Quality. Stormwater Design Specification. Version 2.0 [en línea]. Enero de 2013. [Citado el 2015 de 2015 de 2015.] http://www.deq.virginia.gov/fileshare/wps/2013_DRAFT_BMP_Specs/.
- [8] Atlanta Regional Commission (2001). *Georgia Stormwater Management*, vol. 2. Technical Handbook.

Modelación hidrológica e hidráulica de la laguna de Fúquene y del río Suárez hasta las compuertas de Tolón

Hydrologic and hydraulic modelling of Fúquene lagoon and Suárez river until Tolón gates

JUAN CARLOS PÁEZ CONTRERAS

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

jpaez.ing@gmail.com

Recibido: 18/04/2016 Aceptado: 30/08/2016

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

Resumen

El comportamiento de los cuerpos de agua se ha vuelto un insumo de gran importancia para la realización y conservación de obras civiles, debido al desarrollo de centros poblados a su alrededor. Hay que tener en cuenta que su influencia puede afectar de manera importante cualquier obra si no se toman las precauciones necesarias y se les da el espacio que éstos requieren.

Cuando se analiza un determinado cuerpo de agua se pretende conocer hasta qué altura llegaría la lámina de agua si se inundaran las zonas próximas, o si el caudal alcanzaría cierto valor, buscando que éste no afecte las obras civiles proyectadas o existentes.

Dichos análisis se hacen hoy en día con *softwares* de modelación hidráulica e hidrológica, en los cuales, partiendo de un evento de precipitación y conociendo las características morfométricas y naturales de la cuenca en estudio, se pueden estimar hidrogramas de caudal producto de los eventos. Éstos a su vez se pueden transitar por un cauce, y obtener resultados aproximados sobre lo que sucedería si se presentase dicho evento. Para este caso se ha efectuado un análisis en la laguna de Fúquene y el tramo del río Suárez desde su inicio hasta las compuertas de Tolón, con el fin de delimitar las áreas de inundación y plasmarlas en el denominado “Mapa de riesgo de inundación”. Se han utilizado el *software* HEC-HMS para la modelación hidrológica a partir de hietogramas de eventos teóricos y un evento real, y el *software* HEC-RAS para la modelación hidráulica, realizando modelaciones a flujo permanente y no permanente.

Palabras claves: hidrología, hidráulica, ríos y lagunas.

Abstract

The behavior of bodies of water has become highly relevant information for constructing and maintaining civil works, due to the development of urban areas around them. It should be noted that their influence can heavily affect any work unless all appropriate measures are taken and sufficient space is given to them.

When any given body of water is analyzed, the goal is to determine the highest point the water film can reach if the closest zones are flooded, or whether the flow would reach a certain value that would affect current and projected civil works.

Nowadays, the aforementioned analyses are performed through hydraulic modelling software, which, starting from a precipitation event and knowing the morphometric and natural features of the studied basin, can estimate flow hydrographs resulting from the events. These can therefore be run on a riverbed to obtain approximate results about what would happen were the event to occur.

In this case, an analysis was run in the Fúquene lagoon and the Suárez river stretch comprising its source to the Tolón gates, in order to delimitate the flooding areas and locate them in the so-called “Flood risk map”. On the one hand, HEC-HMS software was used for hydrologic modelling based on rainfall graphs of theoretical events and a real event, on the other hand HEC-RAS software was used for hydraulic modelling, performing permanent and non-permanent flow models.

Keywords: Hydrology; Hydraulics; Rivers; Lagoons.

INTRODUCCIÓN

La laguna de Fúquene es un cuerpo de agua dulce que ha sufrido desbordamientos en más de una ocasión que han afectado a las comunidades que habitan en sus zonas aledañas, causando graves problemas sociales y económicos para el sector. Por sólo nombrar dos casos, tanto en 2006 como en 2011, por cuenta de una intensa ola invernal se inundaron más de 2000 ha, afectando a más de siete de los municipios aledaños. Esta situación pone de manifiesto la urgencia de articular labores desde distintas disciplinas para la gestión del riesgo de inundaciones en uno de los cuerpos acuáticos más importantes del centro del país.

La laguna y el tramo de río seleccionado, además de su importancia en la región, son una zona hidráulicamente particular debido a la presencia de la laguna, sus problemas de pérdida de profundidad y espejo de agua, y la existencia en el río Suárez de las compuertas de Tolón, que mantienen el nivel de agua a una cota necesaria para la captación por parte del municipio de Chiquinquirá.

Con el estudio realizado se determinaron las áreas de inundación de las zonas aledañas a la laguna de Fúquene y al río Suárez hasta las compuertas de Tolón, a partir de un modelo hidrológico de la cuenca de la laguna que establece los hidrogramas de diseño y caudales pico de eventos de precipitación teóricos a diferentes periodos de retorno, y un evento real del año 2011. Estos hidrogramas, a su vez, se transitaron por un modelo hidráulico a flujo permanente y no permanente que contiene secciones topográficas y batimétricas de la laguna de Fúquene y del río Suárez hasta las compuertas de Tolón, obteniendo como resultado las láminas de agua para cada evento y presentando dicha información en el mapa de riesgo de inundaciones.

RESULTADOS

Modelación hidrológica

Para el modelo hidrológico se tomaron como base eventos de precipitación teóricos con periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, y un evento de precipitación seleccionado de los años 2010 y 2011.

El hidrograma resultado del evento seleccionado obtuvo dos picos de 262,5 y 241,3 m³/s, respectivamente, con una duración de dos días y medio, resultado de un evento de cuarenta horas de lluvia con una precipitación total de 71,60 mm.

En la siguiente tabla se pueden observar los caudales pico de los hidrogramas, resultado de los eventos de precipitación teóricos representados por los hietogramas a diferentes periodos de retorno, con una duración total de cinco horas (tabla 1).

Tabla 1
Valores de precipitación máxima de los hidrogramas

Hidrograma	Valor de caudal pico
Hidrograma 5 años	307,0 m ³ /s
Hidrograma 10 años	406,0 m ³ /s
Hidrograma 25 años	580,5 m ³ /s
Hidrograma 50 años	745,9 m ³ /s
Hidrograma 100 años	955,7 m ³ /s

Fuente: Elaboración propia.

Las diferencias en los picos entre el hidrograma del evento 2011 y los hidrogramas del evento teórico se deben, esencialmente, a la duración de los eventos de precipitación; mientras que para el evento 2011 la duración es de cuarenta horas, la duración de los eventos teóricos es apenas de cinco.

Sin embargo, al verificar el volumen de escorrentía resultado de las modelaciones para el evento 2011 es de 19,98 mm, valor cercano al volumen de escorrentía producido por el evento teórico a 25 años del periodo de retorno, que es de 19,25 mm. Por esto se puede considerar que el evento seleccionado del 2011 es cercano a un periodo de retorno de 25 años.

Modelación hidráulica

Para este modelo se transitaron en flujo no permanente los seis hidrogramas resultado del modelo hidrológico, así como sus caudales pico en flujo permanente.

Para el caso del evento, el modelo tuvo como resultado una franja de inundación alrededor de la laguna, que como se esperaba al presentarse un evento extremo, ésta retoma en parte su área inicial; la mancha se extiende tanto por la laguna como por el río Suárez desde su inicio hasta aproximadamente 8,0 km, donde la franja comienza a disminuir hasta desaparecer.

Finalmente, en el último tramo, en donde se esperaba que por la restricción de las compuertas se generara una franja importante de inundación, ésta no se presenta,

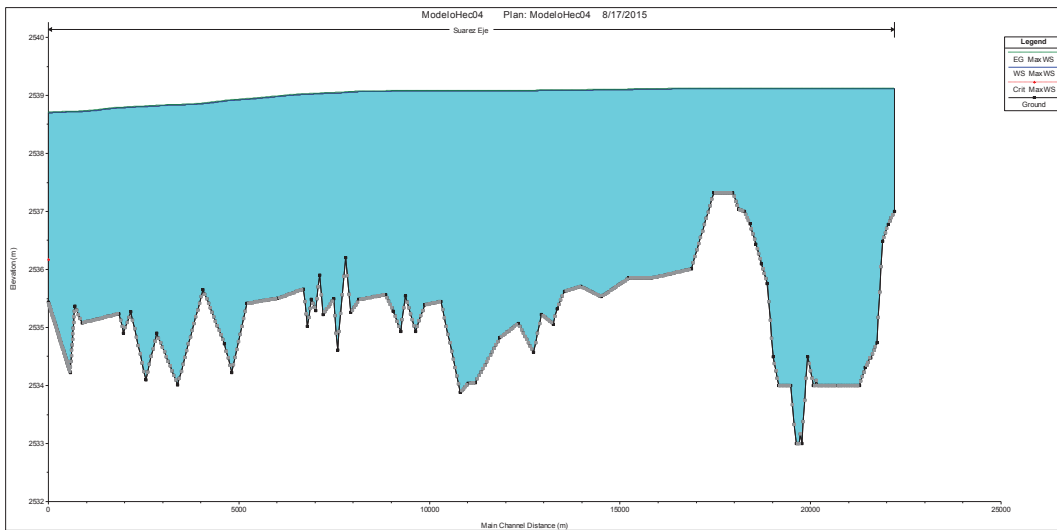


Figura 1. Perfil de flujo en el primer escenario. Modelo HEC-RAS.

por tal motivo se hace un análisis de la influencia que tiene la restricción de cota de aguas en este punto, realizando evaluaciones con varios escenarios en los que se varía este parámetro, y los cuales se presentan a continuación:

En el escenario inicial, donde la restricción tiene una cota de 2538,70 msnm (cota que mantienen las compuertas para garantizar la captación), hay un remanso en el último tramo del río, desde la cota 2440,25 msnm hasta la cota impuesta aguas abajo, con una franja de

inundación que abarca desde el inicio de la laguna hasta 8,0 km del río Suárez (figura 2).

En el segundo escenario, se ha modificado la restricción aguas abajo a un valor de 2537,00 msnm, menor que el del escenario inicial. En éste, como se puede observar (figura 2), se presenta un descenso en el nivel de la lámina de agua en todo el tramo de río en estudio, disminuyendo considerablemente la franja de inundación en el tramo del río.

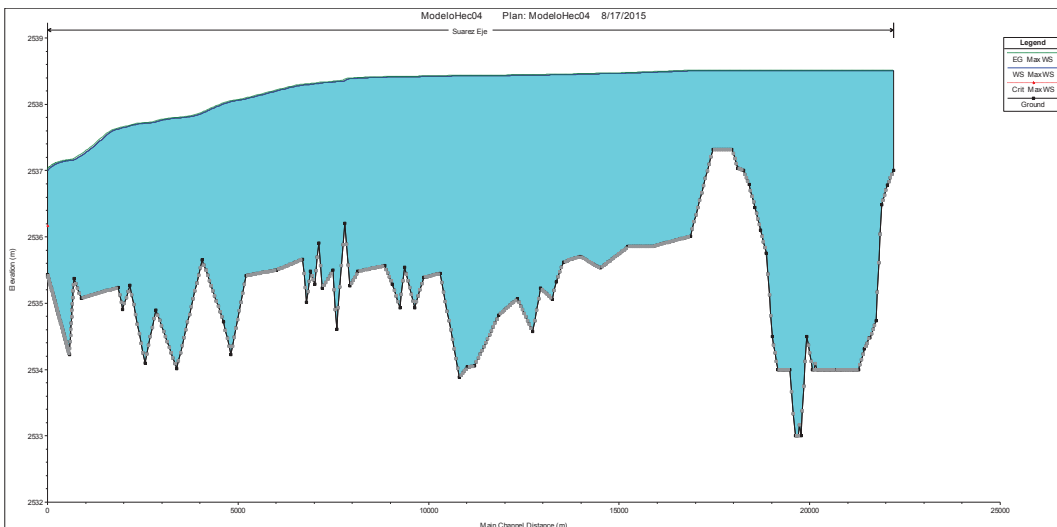


Figura 2. Perfil de flujo en el segundo escenario. Modelo HEC-RAS.

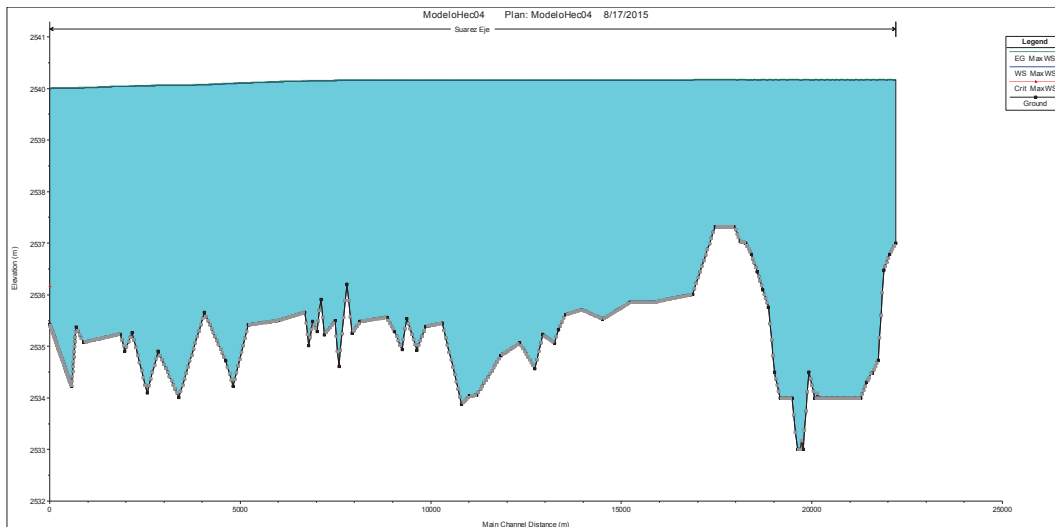


Figura 3. Perfil de flujo en el tercer escenario. Modelo HEC-RAS.

En el tercer escenario se ha modificado el valor de la restricción por 2540,00 msnm, valor superior al del escenario inicial, y cercano al valor de cota de aguas que se registra a lo largo de la laguna y del tramo inicial y medio del río en el primer escenario. Como se muestra en la figura anterior (figura 3), el nivel de agua prácticamente permanece constante en todo el modelo, pues sólo disminuye 0,25 m en el último tramo del río. Sin embargo, la franja de inundación se extiende considerablemente.

En el cuarto escenario se ha modificado el valor de la restricción por 2542,00 msnm, valor superior al del escenario inicial y mayor que el valor de cota de aguas que se presenta a lo largo de la laguna y del tramo inicial y medio del río en el modelo inicial. Como se muestra a continuación (figura 4), con una restricción con esta cota habría un aumento en la cota de aguas en todo el tramo en estudio, produciendo un embalsamiento de agua y, por ende, un aumento en la franja de inundación, que básicamente abarca todo el tramo en estudio.

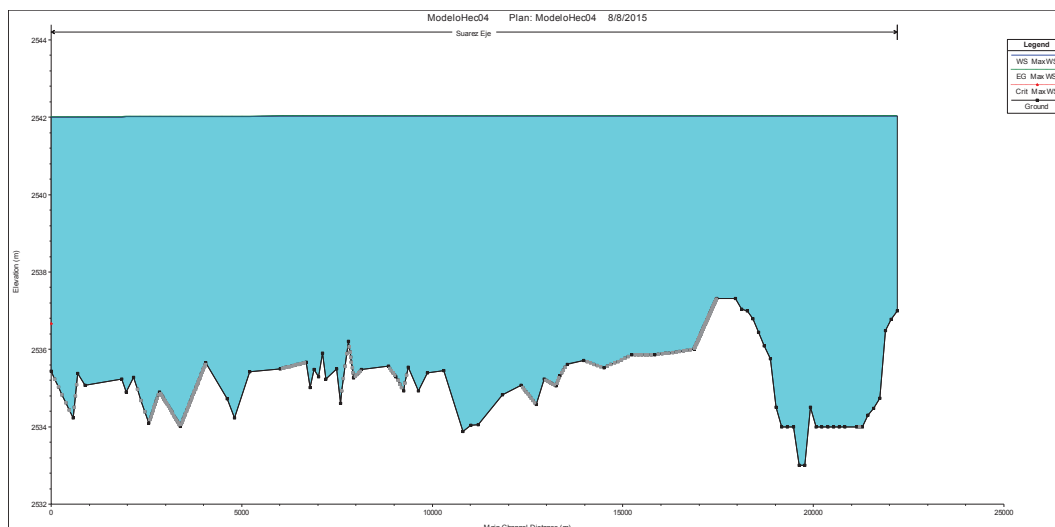


Figura 4. Perfil de flujo en el cuarto escenario. Modelo HEC-RAS.

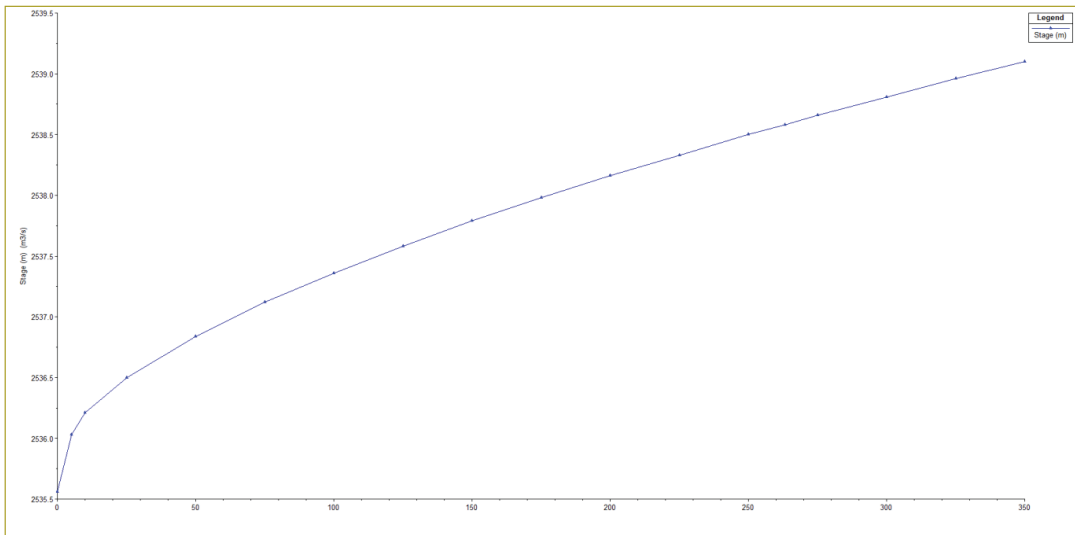


Figura 5. Curva de calibración. Modelo HEC-RAS.

Según los resultados anteriores, se puede concluir que la restricción de las compuertas aguas abajo es una de las causas del incremento en la franja de inundación, restricción que provoca un embalsamiento en toda la franja de río analizada y en la totalidad de la laguna.

Debido a la influencia que tienen las compuertas en el comportamiento de la lámina de agua, se hace un análisis para verificar qué sucedería si en lugar de las compuertas existiera una descarga libre, es decir, que se presentara un flujo crítico. Para esto, en una modelación en flujo no permanente, se debe realizar una curva de

calibración de caudales, la cual se obtienen de correr varios valores de caudal en flujo permanente con condición de flujo crítico aguas abajo, y verificar las cotas de la lámina de agua en la última sección.

Efectuada esta modelación, se obtiene una altura de lámina de agua en la laguna de 2538,54 msnm, bajando a 2538,44 msnm en la parte media del río y descendiendo desde allí hasta llegar a la cota de 2536,54 msnm en su última sección. La franja de inundación se presenta únicamente en la laguna y en el primer tramo del río de manera leve.

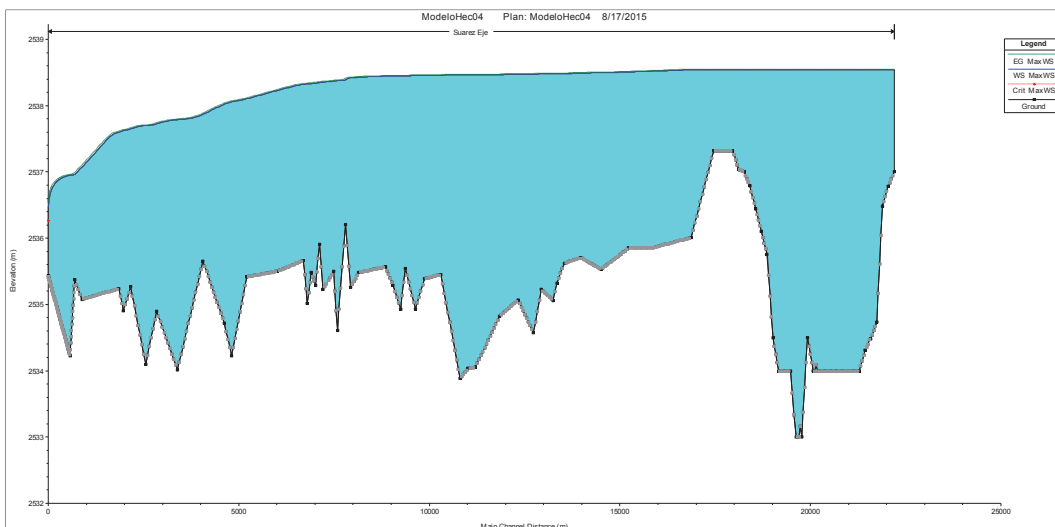


Figura 6. Perfil de flujo en la curva de calibración. Modelación HEC-RAS.

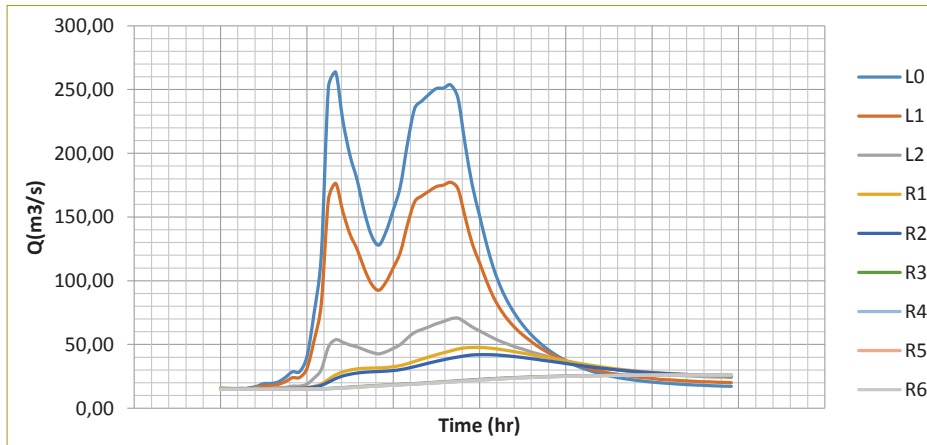


Figura 7. Hidrograma en punto de verificación. Caudal base 15 m³/s.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2
Porcentajes de amortiguamiento caudal base 15 m³/s

	L0	L1	L2	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Q _p	263,80	177,27	70,70	47,72	42,01	26,03	26,02	26,02	26,02
% que queda	100 %	67 %	27 %	18 %	16 %	10 %	10 %	10 %	10 %
% perdido	0 %	33 %	73 %	82 %	84 %	90 %	90 %	90 %	90 %

Fuente: Elaboración propia.

Otro resultado interesante de la modelación realizada fue el amortiguamiento de la crecida. El hidrograma de salida muestra que la crecida se amortiguó casi por completo, por lo que resulta conveniente revisar algunos puntos intermedios y verificar el hidrograma resultante en estos puntos, con el fin de evaluar en qué puntos se genera el mayor amortiguamiento de la crecida.

Como se muestra más adelante (figura 8), el mayor amortiguamiento se presenta en la laguna, aproximadamente un 82,0 %, que sólo hasta el punto R3, correspondiente a 6,18 km de río, se amortigua un 8,0 % adicional, y de este punto en adelante no se presentan diferencias significativas en los hidrogramas, llegando a un amortiguamiento total de 90 %.

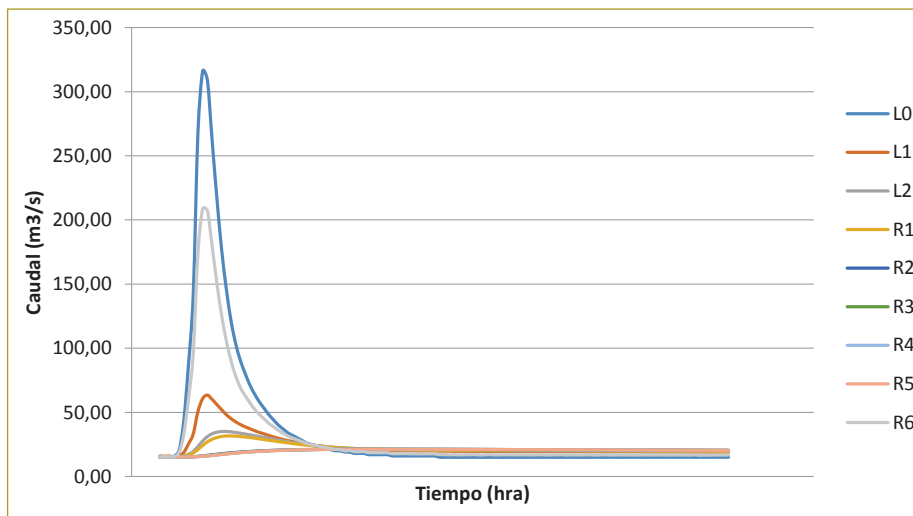


Figura 8. Hidrograma teórico en punto de verificación.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Porcentajes de amortiguamiento hidrograma teórico.

	L0	L1	L2	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Qpico	316.00	208.67	63.40	35.08	31.60	21.25	21.25	21.25	21.25
%Que queda	100%	66%	20%	11%	10%	7%	7%	7%	7%
%Perdido	0%	34%	80%	89%	90%	93%	93%	93%	93%

Fuente: elaboración propia.

Como es de esperarse, se evidencia que la laguna, a pesar de su poca profundidad y su pérdida constante de área, logra amortiguar el 82 % de la creciente, lo que causa que la mayor franja de inundación se presente en los sectores aledaños a la laguna que en un principio pertenecieron a ésta.

También se verificó el amortiguamiento que sucedería con un hidrograma de menor duración, como los hidrogramas teóricos; para este caso se usó el hidrograma con periodo de retorno de cinco años, el cual es el más cercano al valor pico del hidrograma del evento seleccionado, y se obtuvieron los siguientes resultados:

El mayor amortiguamiento se presenta en la laguna, aproximadamente un 89,0 %, que sólo hasta el punto R3, correspondiente a 6,18 km de río, se amortigua un 4,0 % adicional, y de este punto en adelante no hay diferencias significativas en los hidrogramas, llegando

a un total de 93,0 % de amortiguamiento, siendo relativamente mayor que el del hidrograma del evento.

Adicionalmente, comparando el hidrograma de salida del evento y el teórico, se observa que el pico del primero es mayor que el del segundo, pese a que el valor pico del hidrograma de entrada del segundo es mayor que el del primero; esto indica que la laguna y el tramo de río en estudio tienen la capacidad de amortiguar mejor crecientes de corta duración que crecientes de larga duración.

Por último, se analizó la diferencia entre el modelo de flujo permanente con el modelo de flujo no permanente, y se encontraron enormes diferencias en las franjas de inundación y en los perfiles de flujo debido a la gran capacidad de la laguna de amortiguar crecientes. Este resultado demuestra la necesidad de tener en cuenta el amortiguamiento de crecientes en estudios y diseños de obras civiles en cauces.

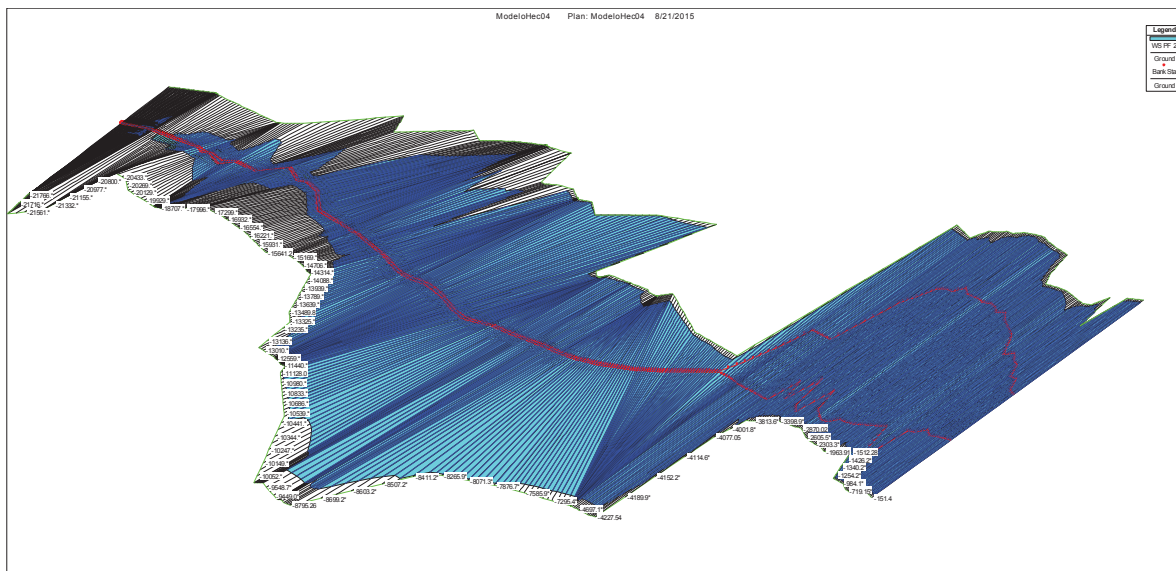


Figura 9. Franja de inundación en el caudal pico del evento. Modelo a flujo permanente. Modelación HEC-RAS.

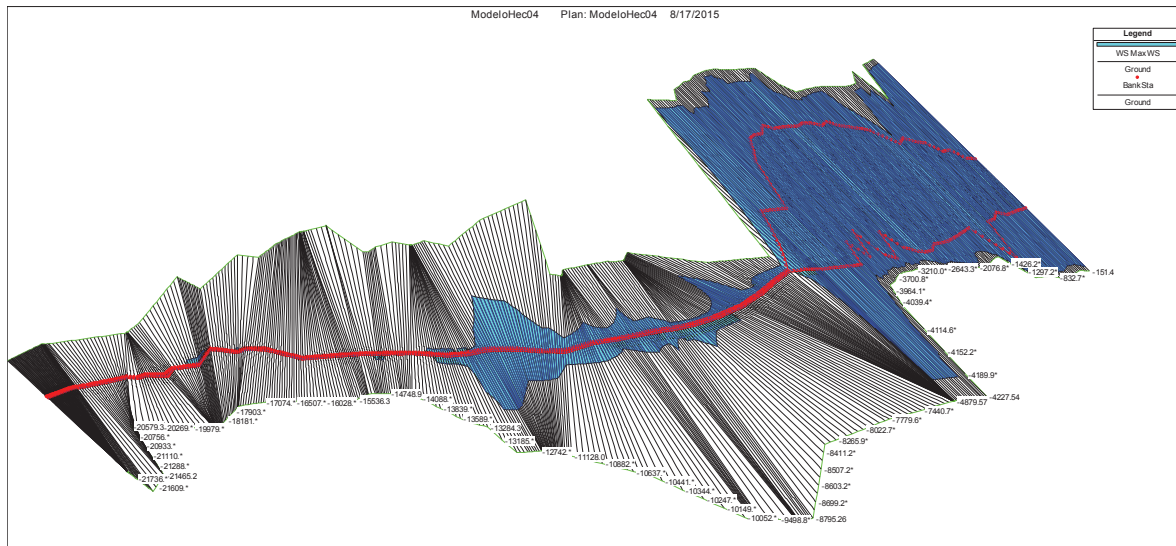


Figura 10. Franja de inundación en el hidrograma del evento. Modelo a flujo no permanente. Modelación HEC-RAS.

CONCLUSIONES

- En la modelación hidráulica se evidencia la importancia de realizar modelaciones a flujo no permanente, ya que en muchos casos el cambio de flujo con respecto al tiempo es incidente en los resultados, y como se demostró, el amortiguamiento de crecientes en cuerpos lagunares y tramos extensos de río pueden llegar a ser importantes y casi totales, como en el presente caso.
- Según los resultados de la modelación hidráulica, variando la restricción aguas abajo se puede concluir que esta es una de las causas del aumento en la franja de inundación; esta restricción provoca un embalsamiento en toda la franja de río analizada, así como en la totalidad de la laguna.
- Es imperativo que la CAR y el Acueducto de Chiquinquirá (Empochiquinquirá) lleguen a un acuerdo en otros métodos de captación que no restrinjan la cota del río, ya que como se observó en el presente estudio, las compuertas de Tolón son unas de las principales causantes del aumento en las franjas de inundación en las zonas aledañas al río Suárez.
- El amortiguamiento de crecientes provocado por la laguna es superior al 80 % en todas las crecientes analizadas. Por lo que se evidencia la importancia de la laguna de Fúquene en este sector, de no existir la laguna, las franjas de inundación en las zonas aledañas al río Suárez serían de gran magnitud, y provocarían mayores daños de los que se presentan en la actualidad en épocas invernales, por lo que es imperativo preservar, mantener y evitar que se continúe perdiendo este cuerpo de agua.
- Al ver estas diferencias, resultaría interesante realizar una modelación en 2D en Iber o en HEC-RAS 2D y hacer comparaciones entre las modelaciones en 1D y 2D.

Cartilla de análisis de arcos metálicos en túneles y ábacos de diseño

Analysis handbook of metallic arches for tunnels and design abacuses

NICOLÁS ANDRÉS CASTAÑO MIRANDA¹ - JOSÉ VICENTE AMÓRTEGUI²

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

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

nicolas.castano@mail.escuelaing.edu.co - jamorteg@gmail.com

Recibido: 01/08/2016 Aceptado: 31/08/2016

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

Resumen

El trabajo dirigido, denominado “Cartilla de análisis de arcos metálicos en túneles y ábacos de diseño”, consiste en el diseño de una herramienta con la cual, a través de la conjugación de variables evaluadas por medio de modelaciones con el *software* de elementos finitos SAP 2000, se agilice el proceso de diseño de arcos metálicos en túneles y se constituya un método para el diseño de arcos metálicos intermedios entre un diseño empírico y uno de detalle, a partir de la implementación de programas de elementos finitos.

Aunque no se consideraron conmutaciones de las variables como la relación de Poisson o el módulo de elasticidad del macizo, con el objeto de limitar la cantidad de modelaciones, se procuró crear los ábacos a partir de las condiciones más relevantes, para así obtener una herramienta práctica y confiable.

Para comprobar la funcionalidad de los ábacos se tuvieron como referencia casos prácticos colombianos, que presentan arcos metálicos de especificaciones menores comparados con los que sugieren algunos de los métodos empíricos, y que han funcionado satisfactoriamente; de este modo se pudo establecer que los ábacos son aplicables y funcionan satisfactoriamente al ofrecer resultados menos conservadores respecto de los empíricos, por lo que son más eficientes.

Palabras claves: diseño, arcos metálicos, ábacos, variables, SAP 2000.

Abstract

The project, named “Analysis handbook of metallic arches for tunnels and design abacuses”, consists of the design of a tool that, through the junction of different variables assessed by the finite elements software SAP 2000, allows the design process of metallic arches for tunnels to hasten and becomes a method for designing intermediate metallic arches between empirical and detailed designs based on finite elements software.

Despite not considering variable commutations such as Poisson’s ratio or the massif’s elasticity modulus, to limit the amount of models, abacuses were created based on the most relevant conditions, so that a practical and reliable tool is obtained.

To test the abacuses’ functionality, practical cases from Colombia were taken into account; they show metallic arches that are below the standards suggested by some of the empirical methods and that have worked satisfactorily. Therefore, it could be established that the abacuses were applicable and work satisfactorily by offering less conservative results than the empirical methods becoming more efficient.

Keywords: design; metallic arches; abacuses; variables; SAP 2000.63.

INTRODUCCION

La necesidad de acortar distancias y optimizar el transporte de carga y pasajeros ha generado que la implementación de túneles viales sea una alternativa que despierte gran interés en Colombia, para lo cual el desarrollo de técnicas y herramientas que faciliten el diseño de túneles en cada uno de sus aspectos, como es el caso de los arcos metálicos, representa un aporte relevante para la ingeniería en el país.

Aunque los métodos empíricos para determinar el arco metálico que hay que implementar en un túnel se presentan como una opción sencilla, traen como consecuencia el desarrollo y puesta en marcha de diseños resistentes –y por ende costosos–, para lo cual la inclusión de programas de elementos finitos, con los que se pueden formular ábacos con diversidad de variables basados en casos reales con resultados satisfactorios, constituyen la oportunidad de contar con un mecanismo sencillo para estimar el arco metálico óptimo en un tiempo corto, no sólo con mayor precisión sino con la posibilidad de optimizar costos.

Por lo tanto, con el desarrollo del presente trabajo se pretende hacer un aporte encaminado a facilitar el proceso de diseño de los túneles a través de una herramienta sencilla, práctica y efectiva.

ÁBACOS Y GUÍA DE EMPLEO

A renglón seguido se presentan dos variaciones de los ábacos de diseño de arcos metálicos en túneles. En la primera se exponen los ábacos de manera gráfica y en la segunda se presenta la alternativa de los ábacos en medio digital, mediante un práctico programa creado en Excel.

Ábacos en figuras

El método presenta nueve juegos de ábacos, cada uno con un título que identifica el tipo de geometría para el cual es útil y el coeficiente de presión lateral de tierras para el cual se formuló. Para cada geometría hay tres ábacos de diseño, cada uno con un coeficiente de presión lateral de tierras diferente. Adicionalmente, cada ábaco tiene en el eje vertical la variación de las cargas por metro lineal que puede soportar cada arco, dependiendo de su geometría y sección de acero, y en el eje horizontal, un rango de radios de 1,5 a 6,0 m.

Además, en cada ábaco se muestran nueve curvas: tres en tonos azules que corresponden al perfil 4WF13, tres en tonos rojizos que conciernen al perfil 6WF20 y tres en tonos verdes que pertenecen al perfil 10WF60. El tono más oscuro de cada uno de los juegos de tres curvas corresponde a un confinamiento del arco del 0 %, el tono intermedio al 50 % y el tono más claro al 100 % de confinamiento.

Más adelante se muestran las características de los ábacos descritas (figura 1).

Datos de entrada necesarios para el uso de los ábacos

Se requiere contar con la siguiente información de entrada para hacer uso de los ábacos:

- Radio en metros del arco.
- Geometría del túnel.
- Coeficiente de presión lateral de tierras al que estará sometido el arco: $K=0,0, 0,5$ o $1,0$.
- Grado de confinamiento esperado.
- Carga por metro lineal al que estará sometido el arco en KN/m.

Cálculo de la carga vertical sobre el arco

Se proponen tres metodologías para el cálculo de la carga a la cual estará sometido el arco: la metodología de Terzaghi, Biron et al. y de convergencia confinamiento.

Datos de entrada para el uso de los ábacos

- Carga por metro lineal, qt (KN/m).
- Radio del túnel, r (m).
- Tipo de sección de acero (4 WF 13, 6 WF 20 o 10 WF 60).
- Geometría del arco metálico (circular, herraduras paredes rectas o herraduras paredes curvas).
- Grado de confinamiento de 0,0 %, 50,0 % o 100,0 %.
- Coeficiente de presión lateral de tierras, K (0,0, 0,5 o 1,0).

Ejemplo de uso de los ábacos

Para mostrar el modo de empleo de los ábacos, se ha propuesto el diseño de un arco que se va a excavar en las siguientes condiciones:

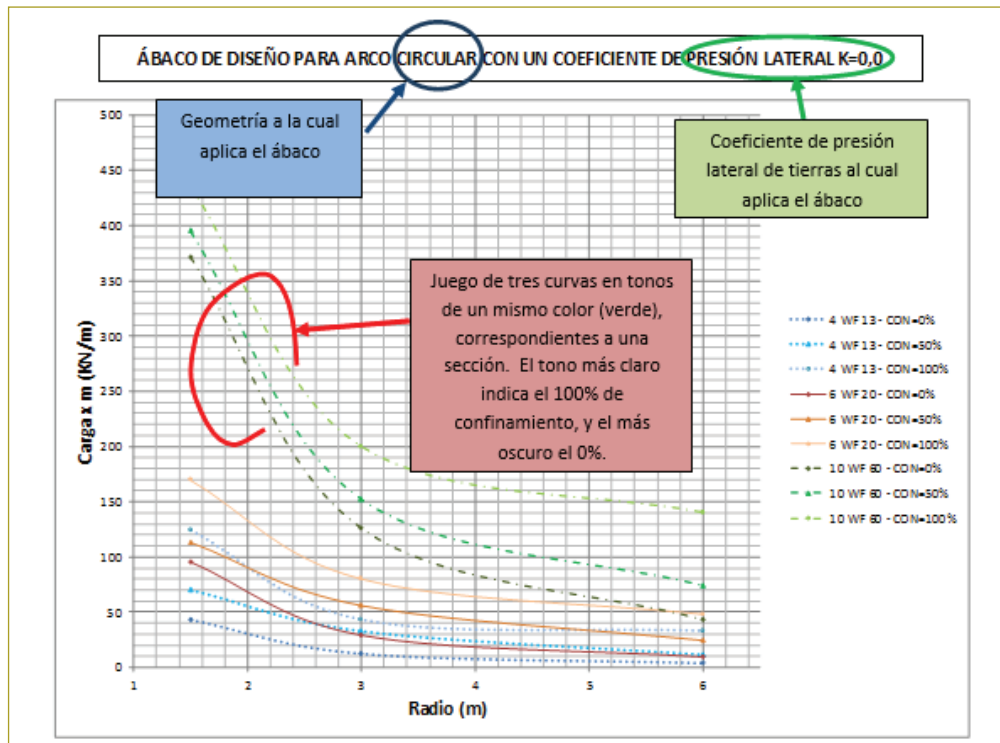


Figura 1. Convenciones empleadas en cada uno de los ábacos.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1
Datos de entrada del ejemplo

Carga por metro lineal	qt	250,00	KN/m
Radio del túnel	r	4,00	m
Tipo de sección de acero	10 WF 60		
Geometría del arco metálico	CIRCULAR		
Coefficiente de presión lateral de tierras	K	1,00	
Grado de confinamiento	100,00 %		

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo disponibles todos los datos de entrada necesarios, se selecciona el ábaco de diseño que incluya la geometría y coeficiente de presión lateral de tierras que se desee analizar.

Seguidamente, en el ábaco escogido, se traza una línea desde el valor del radio del túnel en el eje horizontal, hasta cortar la curva correspondiente a la sección que se desea emplear y el grado de confinamiento esperado, para leer en el eje vertical la carga máxima por metro lineal que puede soportar el arco. Si el valor sacado de

la gráfica es inferior a la carga estimada por metro lineal, indica que el arco soporta las cargas ejercidas por el terreno y puede emplearse sin ningún inconveniente. De lo contrario, quiere decir que se requiere un perfil más robusto, o en el cálculo de la carga se debe considerar un espaciamiento menor entre los perfiles.

Es decir, que para el ejemplo planteado, el ábaco muestra que el arco soporta una carga máxima de 320 KN/m, con un FS de 1,5; por lo tanto, es menor que la carga de 250 KN/m, a la cual estaría sometido el perfil. Por tal motivo, podría ampliarse la separación entre arcos para que la carga vertical sea mayor y que el sistema sea más eficiente.

ÁBACOS DIGITALES

La cartilla en su modo digital (en Excel) tiene la misma funcionalidad de los ábacos en figuras y presenta las siguientes características:

- Un encabezado, que menciona la función de la pestaña de la hoja de cálculo.

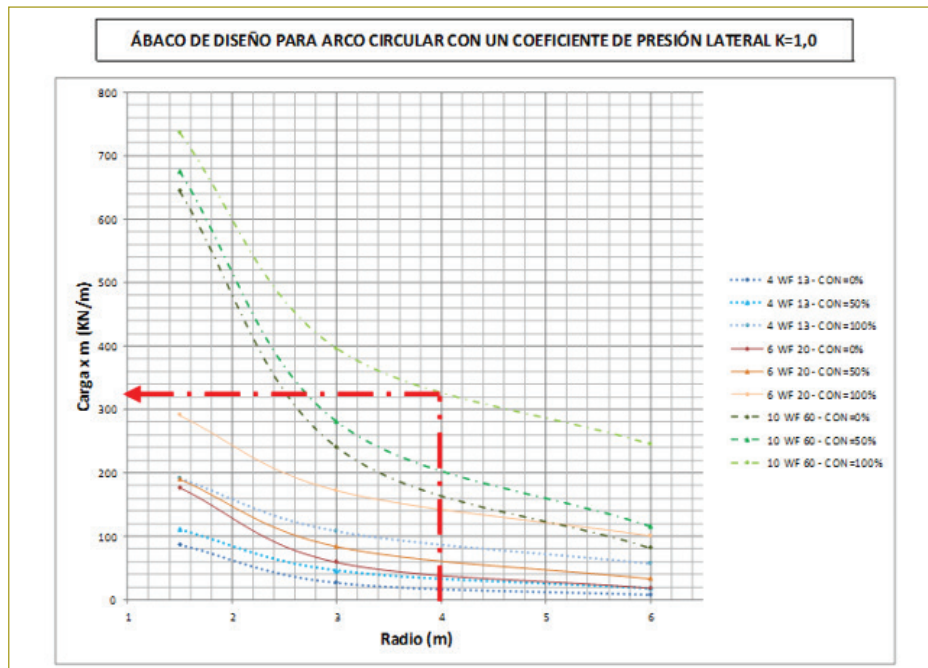


Figura 2. Ejemplo de empleo de los ábacos.

Fuente: Elaboración propia.

- Casillas en color verde (de una sola tonalidad), en las cuales se debe digitar la información de entrada.
- Casillas en color azul para las pestañas de color amarillo, en las que se puede observar el resultado de los cálculos que están programados.
- Un primer sector destinado para el ingreso de los datos de entrada, un segundo sector que muestra el valor máximo que resiste un arco, dependiendo de los datos de entrada que se hayan empleado, e indica en tonalidades verdes si el arco resiste la carga aplicada o en tonalidades naranjas si ocurre lo contrario. En un tercer sector se encuentra una tabla con variaciones en el coeficiente lateral de presión de tierras, tipo de sección del arco y grado de confinamiento, en la cual se torna de colores: en tonalidades verdes las configuraciones que cumplen y en tonalidades naranjas las que no. Esto para tener una idea de si un perfil más esbelto o más robusto es la mejor opción (figura 3).
- No se tuvo en cuenta la influencia del nivel freático.
- El ábaco no incluye la admisibilidad por capacidad portante de la cimentación de los arcos; por lo tanto, ésta se debe revisar por separado.
- En cuanto al confinamiento, los ábacos muestran resultados al considerar un contacto uniforme de la roca en el arco.
- Los ábacos sólo presentan un valor del módulo de elasticidad de la roca, con una magnitud conservadora de 0,1 Gpa o 100.000 KN/m², debido a que los arcos se emplean sólo en rocas de propiedades pobres.
- Los ábacos están hechos con un FS de 1,5 con respecto al límite de fluencia del acero del tipo A36. Este factor de seguridad se recomienda en la bibliografía europea referente al diseño de túneles.
- Los ábacos sólo consideran el aporte al soporte del túnel ofrecido por los arcos metálicos; por lo tanto, no toman en cuenta las contribuciones de otros elementos de soporte, como concreto lanzado, pernos, mallas, etc.
- La estimación de la carga que realmente llega a los arcos metálicos requiere el empleo de uno de los métodos planteados a lo largo de la historia de la geotecnia para este tipo de proyectos, y su adecuado

VARIABLES Y LIMITACIONES

Específicamente, para las modelaciones se consideraron las siguientes variables y limitaciones:

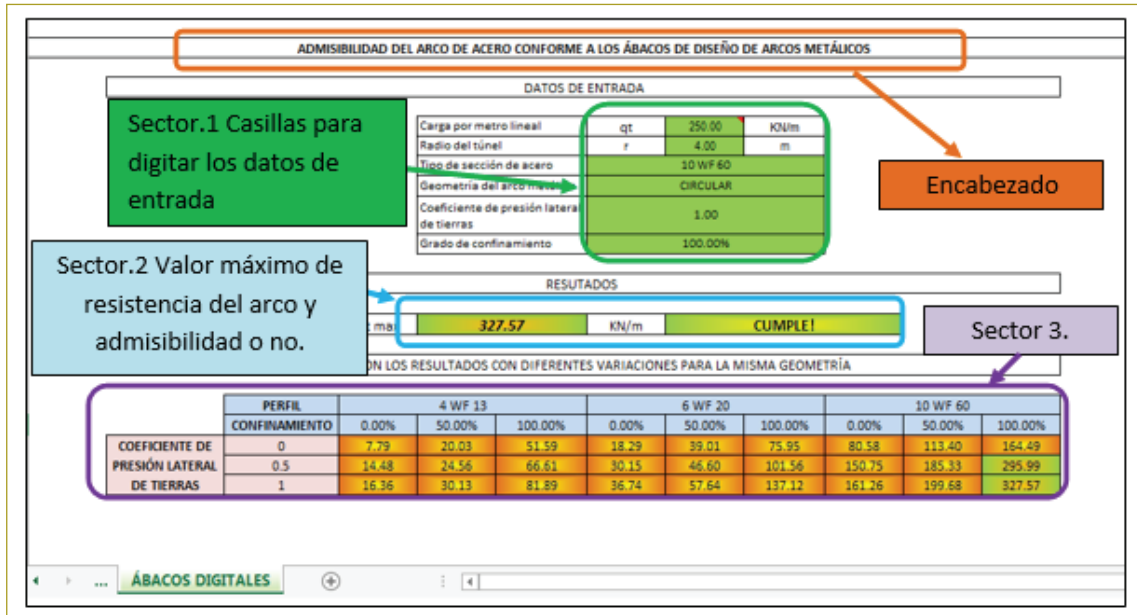


Figura 3. Características del ábaco digital en la pestaña de cálculo de admisibilidad de un arco metálico.

Fuente: Elaboración propia.

cálculo cumple un papel crucial en el funcionamiento adecuado de los ábacos. Para ello se deben determinar en forma precisa los parámetros geotécnicos de la roca presente.

- La elección de un grado de confinamiento o una presión lateral debe ser acorde con las particularidades de cada proyecto.
- Los ábacos consideran cargas completamente verticales y horizontales, con variaciones del coeficiente de presión lateral de tierras K de 0,0, 0,5 y 1,0.
- Los ábacos fueron creados para tres tipos de geometrías: circular, herradura paredes rectas y herradura paredes curvas, con las configuraciones geométricas mostradas a continuación (figura 4):

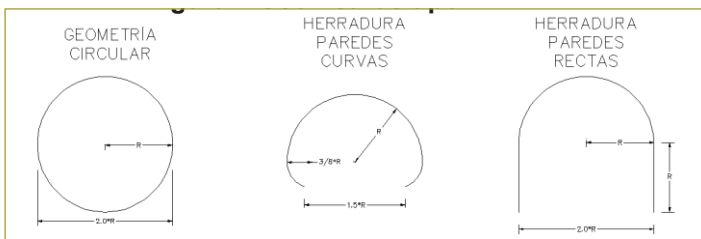


Figura 4. Geometrías tipo.

Fuente: Elaboración propia.

Su implementación con una geometría diferente debe hacerse de manera conservadora.

- Se considera un apoyo simple para las modelaciones, debido a que restringe el movimiento lateral y vertical en los apoyos.

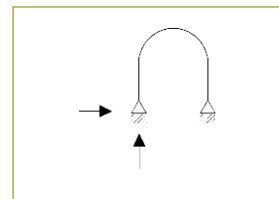


Figura 5. Apoyo simple.

Fuente: Elaboración propia.

- Los ábacos comprenden la variación en el grado de confinamiento ocasionado por la roca de 0,0, 50,0 y 100,0 %, distribuidos gráficamente de la siguiente manera:

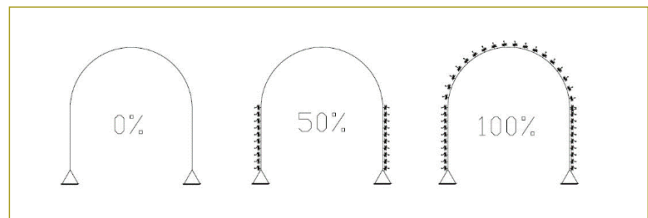
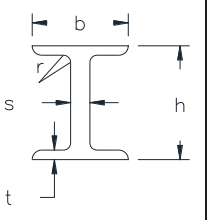


Figura 6. Grados de confinamiento.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2
Secciones tipo

		ESPECIFICACIONES TECNICAS - PERFILES AMERICANOS TIPO WF										
		DIMENSIONES					AREA	PESO	MOMENTO DE INERCIA		MODULO DE SECCION	
PERFIL		h	b	s	t	r	cm ²	Kg/m	I _x	I _y	W _x	W _y
		mm							cm ⁴		cm ³	
WF	4"x13	102	100	6.5	9.4	6	24.5	19.3	438	158	86.2	31.5
WF	6"x20	157	153	6.6	9.3	6	37.9	29.7	1723	553	219	72.3
WF	10"x60	260	256	10.7	17.3	13	114	89.4	43	4835	1093	378

Fuente: Elaboración propia.

- Los ábacos comprenden un rango de radios de 1,5 a 6,0 m.
- Las modelaciones efectuadas con SAP 2000 consideraron un acero para los arcos metálicos del tipo A36 (ASTM), el cual es el más frecuente para este tipo de estructuras. El límite elástico para este acero es de 254.930 KN/m², y con un FS de 1,5 es de 169.950 KN/m².
- Se consideraron sólo tres secciones tipo, de proveniencia americana (tabla 2).
- Los ábacos presentan una limitante con respecto al radio mínimo de curvatura de cada uno de los perfiles propuestos, definido por la siguiente ecuación:

$$\text{Radio mínimo de curvatura} = 11,5 \times \text{altura del perfil}$$

Por lo tanto, para los arcos circulares, de herradura de paredes rectas (HPR) y herradura de paredes

- curvas (HPC), los ábacos son aplicables a partir de los radios mostrados en la tabla siguiente (tabla 3).
- Los ábacos, acorde con las cargas máximas aplicables según las variables definidas, presentan convergencias inferiores al 5 %, lo que los enmarca en un rango admisible según los criterios de aceptación definidos en el libro *Manual de túneles y obras subterráneas*, de Carlos López Jimeno, en el cual la convergencia admisible para túneles mineros es del 20 % y para galerías en general del 5 %.

CONCLUSIONES

1. Con la ejecución de la modelación de los casos prácticos, considerando las condiciones particulares de éstos, se muestra que el método con las modelaciones de SAP 2000 es aplicable y funciona satisfactoriamente; además, ofrece resultados menos

Tabla 3
Radios mínimos de curvatura para los arcos circulares, HPR y HPC

GEOMETRÍA	PERFIL	ALTURA DEL PERFIL	RADIO MÍNIMO DE CURVATURA	RADIO MÍNIMO DE CURVATURA	OBSERVACIONES
		(mm)	(mm)	(m)	
CIRCULAR y HPR	4 WF 13	102,00	1173,00	1,17	Los ábacos son útiles con radios superiores o iguales a los presentados en la columna anterior
	6 WF 20	157,00	1805,50	1,81	
	10 WF 60	280,00	3220,00	3,22	
HPC	4 WF 13	102,00	3128,00	3,13	Los ábacos son útiles con radios superiores o iguales a los presentados en la columna anterior, teniendo en cuenta que el radio crítico de esta geometría corresponde a 3/8 del radio principal.
	6 WF 20	157,00	4813,00	4,81	
	10 WF 60	280,00	8586,00	8,59	

Fuente: Elaboración propia.

conservadores a los estimados con métodos empíricos y más eficientes (pues permite encontrar el arco óptimo que se va a emplear en un túnel, para lo cual los ábacos creados a partir de la implementación del programa de elementos finitos presentan resultados coherentes).

2. Los ábacos permiten estimar el arco metálico que funcione adecuadamente de manera rápida y de menores especificaciones que las sugeridas por métodos semiempíricos, como el de Biron et al., con la limitante de estar concebidos sin tomar en cuenta factores como la influencia del nivel freático y demás mencionados.
3. Se deben tener presentes las limitaciones de los ábacos al momento de usarlos para el diseño de arcos metálicos, de modo tal que esto permita una adecuada elección de las variables y, en consecuencia, la selección del arco indicado.
4. Los métodos como el de Biron y similares empleados para el diseño de arcos metálicos no tienen en cuenta factores como el confinamiento y los esfuerzos laterales, por lo cual generan arcos resistentes y, por ende, costosos.
5. El desarrollo de este proyecto de grado tuvo como cimiento el diseño de una propuesta metodológica racional, al implementar un programa de elementos finitos para analizar diferentes geometrías, grados de confinamiento, perfiles, dimensiones del túnel y esfuerzos laterales.
6. Es posible y recomendable aplicar nuevas variables que modifiquen las limitaciones establecidas para la creación de los ábacos en este proyecto de grado, con el propósito de afinar el método y otorgarle mayor precisión.

REFERENCIAS

Hoek, E. & Brown, T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. England: Institution of Mining and Metallurgy.

Hoek, E., Kaiser, P.K. & Bawden, W.F. (2000). *Support of underground excavations in hard rock*.

Birón, C. & Arioglú, E. (s.f.). *Diseño de ademes en minas*. Limusa S.A. de C.V.

Proctor, R. V. & White, T. L. (1957). *Rock Tunneling With Steel Supports*. Ohio: The Commercial Shearing & Stamping Company. Youngstown.

Department of the Army (May 1997). *Tunnels and Shafts in Rock*. Washington: U.S. Army Corps of Engineers (236 pp).

López Jimeno, C. (1999). *Ingeotúneles*, tomos 1 al 5.

López Jimeno, C. (1999). *Túneles y obras subterráneas*, tomos 1 al 5.

Oreste, P. (2005). A probabilistic design approach for tunnel supports. *Journal of Computers and Geotechnics*, 32.

Rabcewicz, L.V. (1964-65). The New Austrian Tunnelling Method. *Geoconsult* (diciembre de 1964-enero de 1965).

Barton, N. & Grimstad, E. (1994). The Q system following twenty years of application in NMT support selection. *Österreichische Gesellschaft für Geomechanik - Felsbau*, 12 (6): 428-436.

Otero, D.F. & Saavedra, L.F. (2006). Metodología de diseño de soportes con arcos para túneles aplicado a Colombia. Tesis de grado. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería Civil. Programa de Geotecnia.

Gutiérrez, R. Presentaciones de mecánica de rocas de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá.

Carranza-Torres, C. & Labuz, J. (june 2006). *Rock and Soil Mechanics and Tunneling Notes*. University of Minnesota. Department of Civil Engineering.

Hoek, E. (2006). *Practical Rock Engineering*. England: Institution of Mining and Metallurgy.

Yusuf, E. & Orhan, E. (2004). Correlations for Quick Prediction of Swell Pressures. www.ejge.com.

Trujillo, J. (2011). *Evaluación de recomendaciones de diseño para túneles excavados en materiales volcánicos y suelos residuales*. Tesis de grado. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil. Programa de Geotecnia.

Potvin, Y. & Hadjigeorgiou, J. (2008). Ground support strategies to control large deformations in mining excavations. 6th International Symposium on Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction. Cape Town.

Barla, G. (s.f.). *Tunnelling under squeezing rock conditions*. Department of structural and Geotechnical Engineering. Politecnico di Torino.

Bieniawski A.T. (1990). Tunnel design by rock mass classifications. Pennsylvania State University, Department of Mineral Engineering.

Universidad Politécnica de Madrid (s.f.). Ingeniería geológica. Excavaciones subterráneas.

González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuno, L. & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Pearson educación.

Illidge, É. (2008). Aplicación de un modelo ciscoplastico para analizar el comportamiento mecánico de las rocas en un pozo utilizando el software de simulación Ansys. Tesis de grado. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Civil.

Hoek, E. (September 2001). Big tunnels in bad rock 2000 Terzaghi lecture. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127 (9), 726-740.

Robles, N. (1994). Excavación y sostenimiento de túneles en roca. Lima: Concytec.

Tedesa (s.f.). Técnicas en entibación S.A. Arcos del tipo TH. www.dfdurofelguera.com.

Dywidag-Systems International (DSI). Arcos de acero para túneles. www.dsiunderground.com.

Retroanálisis de las deformaciones obtenidas en estructuras de contención instrumentadas

Retrospective analysis of deformations obtained from instrumented containment buildings

ÉDISON FERNEY GARZÓN MONTAÑO

Ingeniero civil de la Universidad Nacional de Colombia. Especialista en Ingeniería de Fundaciones y Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

edison.garzon@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 03/05/2016 Aceptado: 01/09/2016

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

Resumen

Los métodos empíricos para el diseño de excavaciones soportadas con pantallas se desarrollaron hace algunas décadas, pero no se han validado para los ambientes lacustres de la sabana de Bogotá. En este trabajo se hace un retroanálisis de las deformaciones obtenidas con inclinómetros y las calculadas con el programa Phase, además de que se comparan las presiones de tierras obtenidas con métodos clásicos y el análisis numérico. Este procedimiento permitió contrastar los parámetros de resistencia del retroanálisis con valores de referencia de la arcilla lacustre de Bogotá y los del estudio geotécnico del caso de estudio.

Palabras claves: retroanálisis, pantallas, excavaciones profundas, elementos finitos, métodos empíricos.

Abstract

The studies of slurry walls for support excavations in clay soils are normally based on empirical analyses developed several years ago. In this document, the geotechnical behavior of slurry walls in soft soil of Bogotá is analyzed from inclinometer measurements (Retrospective Analysis). Numerical analyses are performed with a finite element program (Phase) to obtain the strength parameters; these results are compared with typical and real values of soft clay of a zone in Bogotá.

Keywords: retrospective analysis, deep excavations, finite elements, empirical analyses.

INTRODUCCIÓN

Si una obra de contención dispone de instrumentación y su modelo se ha calibrado, puede ser un elemento estratégico en la toma de decisiones y en la reducción de costos con respecto a la necesidad de complementar las obras planteadas en un proyecto.

Aunque los elementos finitos ofrecen ventajas de cálculo y de visualización de resultados frente a los métodos clásicos, estos últimos aportan una sencillez que permite conceptualizar la dimensión de la estructura.

En este artículo se presentan los resultados de un análisis retrospectivo de las deformaciones y presiones de tierra que pueden actuar sobre una pantalla de concreto instrumentada y que se han comparado con métodos convencionales de diseño.

METODOLOGÍA

El procedimiento básico, para el retroanálisis planteado, fue el siguiente:

1. Evaluación de un proyecto de excavación profunda en el ambiente lacustre de la ciudad de Bogotá, en la cual se empleen pantallas de concreto preexcavadas. Dicha estructura se debe instrumentar con inclinómetros y, en la medida de lo posible, con algún otro tipo de instrumentación geotécnica.
2. Recopilación de información de investigación geotécnica.
3. Planteamiento y definición del modelo geotécnico.
4. Modelación numérica y cálculo de las deformaciones y presiones de tierra ejercidas sobre la estructura, empleando el programa de elementos finitos (Phase). Esta modelación será iterativa y buscará ajustar los niveles de deformación instrumentados con los calculados por el modelo numérico; dicha retrospectiva se basará en el ajuste de los parámetros geotécnicos de resistencia.
5. Evaluación de presiones de tierra por el método de Peck y Rankine y comparación.

La información relativa a la localización del proyecto se reserva por solicitud de los clientes y de las empresas que suministraron la información de instrumentación. Cabe destacar que este artículo forma parte de una investigación en curso y con lineamientos hacia el futuro.

GENERALIDADES DE LAS PANTALLAS DE CONTENCIÓN

Los muros pantalla presentan importantes ventajas, como la posibilidad de alcanzar grandes profundidades, con presencia o no del nivel freático, atravesar estratos en los cuales no es posible hincar tablestacas, menor ruido y vibración durante su ejecución, entre otras cualidades; además, como lo indica su nombre, se deforman al resistir los empujes del terreno.

Los muros pantalla de concreto son elementos continuos que se construyen en paneles discontinuos, directamente en el terreno desde la superficie. La estabilidad de la zanja, en la cual se construyen dichos módulos, se garantiza por el empleo de diversos lodos tixotrópicos.

El diseño de pantallas tiene por objeto definir la profundidad de empotramiento, calcular las reacciones en los apoyos, y estimar los esfuerzos y deformaciones en la pantalla, además, se deben considerar:

- Estabilidad de la pantalla frente a los empujes de tierra, lo que implica lograr un equilibrio entre las cargas previstas en los sistemas de contención y el empuje pasivo de la zona empotrada, respecto del empuje activo en el espaldar de la pantalla.
- Estabilidad general o global de la estructura y el talud.
- Estabilidad del fondo de la excavación, lo cual se refiere a la posibilidad de sifonamiento y al levantamiento de fondo.

Entre las metodologías empleadas históricamente (Moya, 2007) para el cálculo de este tipo de estructuras, se encuentran las siguientes:

- *Métodos clásicos.* Se fundamentan en consideraciones básicas de equilibrio límite.
- *Métodos semiempíricos.* Se basan en conceptos de equilibrio límite, pero con modificaciones empíricas deducidas de estudios experimentales o mediciones en casos reales.
- *Métodos de interacción suelo-estructura.* Se basan en consideraciones de interacción suelo - estructura, por lo que se puede incluir en este método el modelo de Winkler o del coeficiente de reacción, los cuales suponen que la reacción del suelo en un punto de la pantalla depende sólo del desplazamiento de dicho punto.

- *Métodos numéricos.* Son más precisos y versátiles que los anteriores, además de que pueden modelar con mayor grado de similaridad la realidad del problema.

Métodos clásicos (equilibrio límite y semiempírico)

Los métodos clásicos se basan en las teorías de equilibrio límite, cuya hipótesis principal es que el cuerpo se encuentra en equilibrio a lo largo de ciertas líneas de deslizamiento, las cuales limitan la cuña de rotura sobre la que se produce el movimiento de la masa.

Estos métodos consideran que los desplazamientos de la estructura han sido suficientemente grandes para alcanzar los estados límites activo y pasivo del terreno.

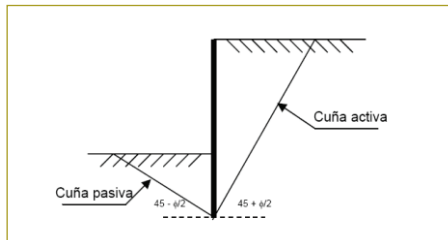


Figura 1. Modelo simplificado de cuñas de rotura en un muro pantalla (autor).

A continuación se presenta de manera sucinta la eficacia de los métodos convencionales, sin entrar en detalle con otros métodos, tales como el empírico de Peck (1969) y la teoría de Rankine.

Las pantallas en voladizo resisten el empuje de tierras cuando se equilibran los momentos actuantes contra los resistentes en un punto de giro determinado; es decir, cuando los empujes activos son contrarrestados con los pasivos de la parte empotrada.

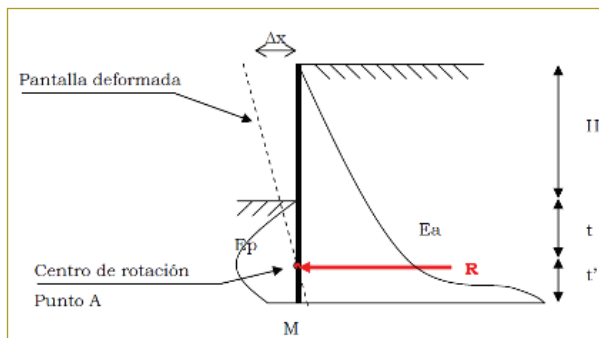


Figura 2. Pantalla de contención en voladizo (diagrama simplificado de cuerpo libre) (Notas de clase: Julio Moya, 2007).

Con un análisis de diagrama de cuerpo libre, se puede determinar:

- Longitud de empotramiento mínima, t (tomando momentos en relación con A; $\Sigma MA = 0$)

$$E_a \cdot \frac{1}{3} \cdot (H + t) - E_p \cdot \frac{1}{3} \cdot t = 0 \rightarrow K_a \cdot (H + t)^3 = K_p \cdot t^3;$$

$$\sqrt[3]{K_a} \cdot (H + t) = \sqrt[3]{K_p} \cdot t \rightarrow \frac{H + t}{t} = \sqrt[3]{K_p / K_a}$$

La longitud de empotramiento será:

$$t = H \cdot \left(\frac{1}{\sqrt[3]{K_p / K_a} - 1} \right)$$

- Profundidad del momento máximo, $Z_{m\acute{a}x}$:
Suponiendo $E_a = E_p$

$$\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (H + z_{m\acute{a}x})^2 \cdot K_a = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot z_{m\acute{a}x}^2 \cdot K_p;$$

$$H + z_{m\acute{a}x} = z_{m\acute{a}x} \cdot K_p \rightarrow z_{m\acute{a}x} = H \cdot \left(\frac{1}{K_p - 1} \right)$$

Ahora, la profundidad del momento máximo es:

$$z_{m\acute{a}x} = H \cdot \left(\frac{1}{K_p - 1} \right)$$

- Valor del momento máximo, $M_{m\acute{a}x}$:
Se supone que el esfuerzo cortante es nulo.

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{1}{6} \cdot \gamma \cdot K_p \cdot H^3 \cdot \left(\frac{1}{[K_p / K_a - 1]^2} \right)$$

La ecuación anterior se puede escribir también así, en función de la profundidad del momento máximo:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{1}{6} \cdot \gamma \cdot K_a \cdot (H + Z_{m\acute{a}x})^3 - \frac{1}{6} \cdot \gamma \cdot K_p \cdot z_{m\acute{a}x}^3$$

Métodos semiempíricos

En la principal o más reconocida metodología empírica, planteada por Terzaghi y Peck (1969), se definen tres diagramas de presiones aparentes para arcillas y arenas.

RETROANÁLISIS: APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Las propiedades del modelo geotécnico (cohesión, ángulo de resistencia interna, módulo de elasticidad, relación de Poisson y peso unitario) son datos de entrada básicos en la simulación numérica. Para las arcillas de Bogotá se han encontrado los siguientes valores típicos de los parámetros de resistencia, en términos de la envolvente de Mohr-Coulomb:

$$\text{Esfuerzos efectivos: } c' = 0 - 0,45 \text{ kg/cm}^2$$

$$\phi' = 20^\circ - 35^\circ$$

$$\text{Esfuerzos totales: } c' = 0,1 - 0,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\phi' = 10^\circ - 20^\circ \text{ (Moya, 1987)}$$

CASO DE ESTUDIO

Generalidades y sección tipo

El paso a desnivel o deprimido se proyectó mediante la construcción de pantallas preexcavadas, apuntaladas en las partes superior e inferior con vigas de concreto reforzado. Las pantallas se construirán antes de iniciar

la excavación. En términos generales, el paso a desnivel tendrá las siguientes dimensiones:

Longitud total: 400 m, ancho máximo: 11,0 m, profundidad máxima: 7,0 m, profundidad de la pantalla: 15,0 m, ancho de la pantalla: 0,35 m. Viga puntal superior: altura: 0,80 m, ancho: 0,50 m. Viga puntal inferior: altura: 0,80 m, ancho: 0,50 m.

La pantalla tiene un espesor de 0,35 m y una longitud de 15,0 m. En la siguiente planta y corte se esquematiza el proyecto estructural para la sección de mayor profundidad de excavación y se resume lo expuesto en el anterior párrafo:

Las hipótesis en la modelación numérica fueron las siguientes:

- Se escogió como ley constitutiva de los elementos de suelo el modelo elastoplástico (no lineal), de Mohr - Columb, con una misma función de fluencia y falla.
- Se escogió como ley constitutiva de los elementos estructurales (vigas en concreto, pantallas en concreto) el modelo elastolineal que usa la teoría convencional de vigas (Timoshenko).

Las presiones laterales se han calculado a partir de las siguientes teorías o métodos:

- Teoría de Rankine.
- Método empírico de Peck.

Adicionalmente, los análisis se han hecho con las siguientes consideraciones:

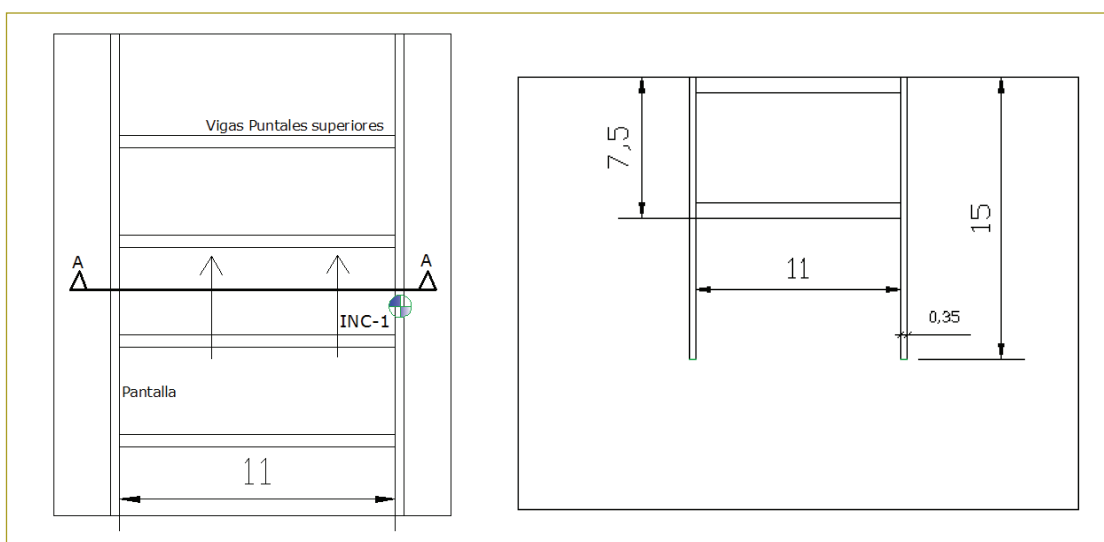


Figura 3. Planta y corte esquemático transversal del proyecto (sección A-A).

1. Por un proceso iterativo, se modificaron los parámetros de resistencia de los materiales hasta ajustar aproximadamente las deformaciones numéricas con las obtenidas de campañas de instrumentación. El peso unitario y la relación de Poisson se tomaron como valores fijos y no como variables dentro de los análisis.
2. La evaluación de deformaciones y presiones de tierra se ha realizado para la etapa constructiva que ha reportado mayor desplazamiento; es decir, para un solo instante de obra y para una sola sección geotécnica en cada caso de estudio.
3. La altura del nivel freático se tomó como el promedio de las mediciones para la etapa constructiva correspondiente y con piezómetros aledaños o cercanos a la sección geotécnica de interés.
4. El criterio general para definir la similitud de deformaciones entre los resultados de campañas de instrumentación y los resultados numéricos fue el siguiente:
 - En la corona y la base de la excavación se procuró que las deformaciones coincidieran con un margen de 0,50 cm.
 - En los demás puntos de la sección de análisis se admitió que las deformaciones tuvieran un margen de 1,0 a 1,5 cm.
5. Alrededor de la pantalla y con el fin de densificar la malla, y por ende la discretización del medio, se adicionaron fronteras (*boundaries*), que han permitido mejorar los resultados.

Para este proyecto, luego de finalizar el retroanálisis, se obtuvieron los siguientes resultados (tabla 1):

El nivel freático o nivel de agua libre se adoptó a -2,50 m de profundidad.

Proceso constructivo

Con el propósito de modelar la excavación en el programa de elementos finitos Phase, de Rocscience, se han seguido las etapas constructivas que corresponden al proceso ejecutado durante el desarrollo de la obra (tabla 2).

Tabla 2
Etapas constructivas

Etapa constructiva N.º	Descripción
1	Inicialmente se procede a replantear y fundir las pantallas de espesor 0,35 m y 15 m de profundidad.
2	Excavación general de -1,0 m, con sobreebanco de 2 m y taludes temporales con inclinación 1H:1V. Construcción de la viga cabezal.
3	Construcción de las vigas puntales superiores (S: 0,8*0,50 m).
4	Excavación hasta la cota -7,50 m, por trincheras con anchos inferiores a 7,0 m. Construcción de la viga cabezal inferior. (S: 0,8*0,50 m).
5	Construcción de la viga puntal inferior y la placa de fondo.

A continuación se presentan el modelo geotécnico asumido para los análisis respectivos y su implantación en el programa de elementos finitos (figura 4), así como los resultados gráficos de presiones de tierra (en ton/m²) y deformaciones horizontales (en mm) (figura 5).

Tabla 1
Resultados del proyecto

Profundidad (m)		Material	ϕ_p (°)	ϕ_r (°)	C_p (t/m ²)	C_r (t/m ²)	Peso unitario (t/m ²)	E (t/m ²)	ν
0	2,5	Relleno	28	24	0,0	0,0	1,7	550	0,35
2,5	4,5	Arcilla (CH)	26	23	1,2	0,5	1,5	950	0,4
4,5	24	Arcilla limosa (MH-CL)	23	20	0,8	0,3	1,4	750	0,4

ϕ_p : ángulo de resistencia pico; ϕ_r : ángulo de resistencia residual; C_p : cohesión pico; C_r : cohesión residual; E: módulo de elasticidad; ν : relación de Poisson.

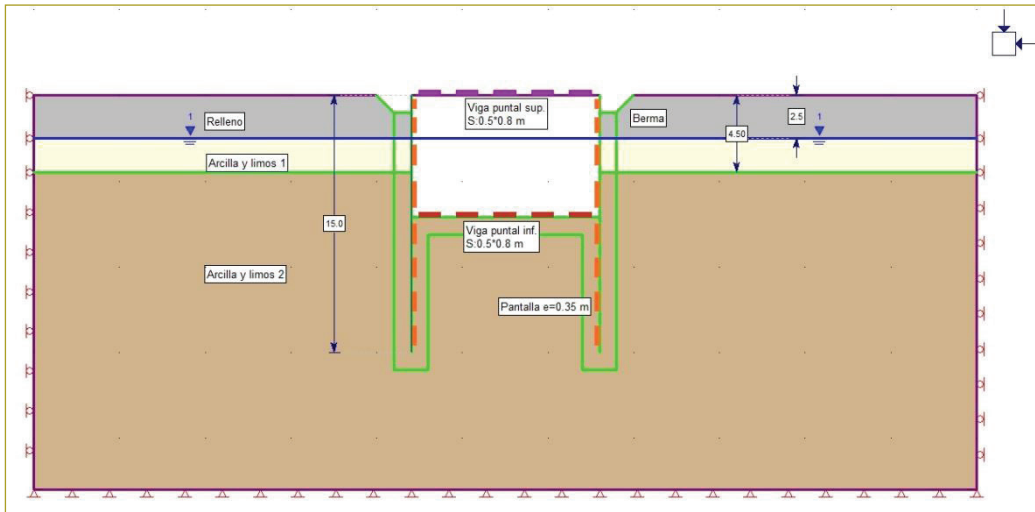


Figura 4. Caso de estudio. Modelo geotécnico establecido en el programa de elementos finitos Phase, etapa 8 del proceso constructivo.

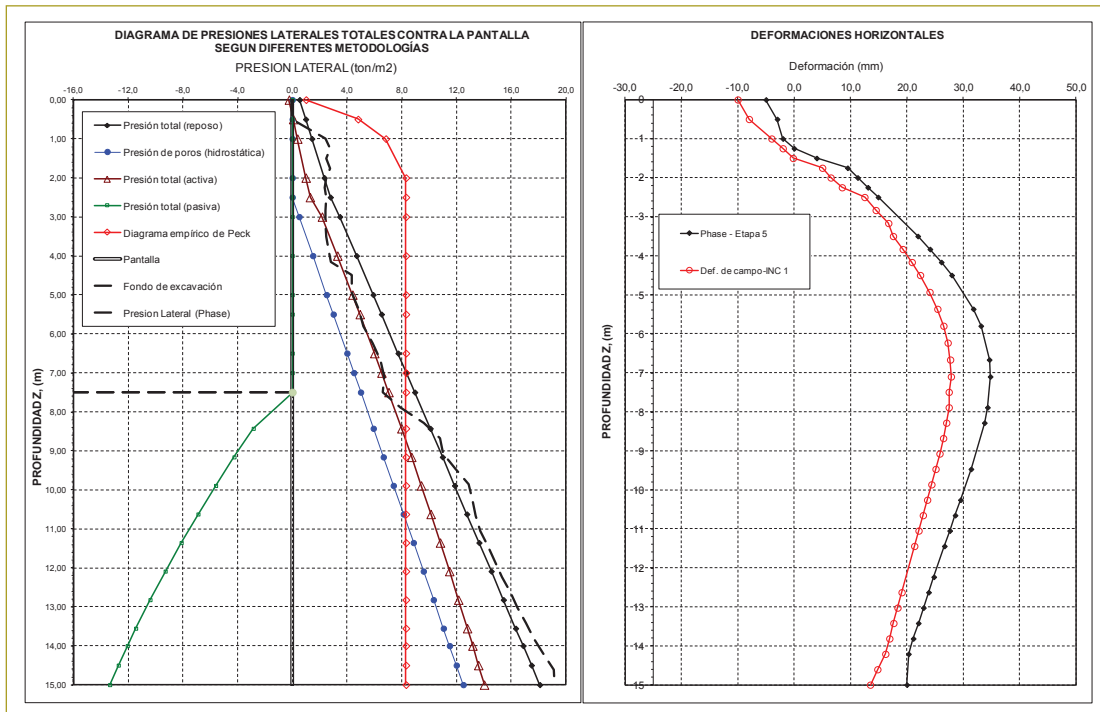


Figura 5. Resultados gráficos de presiones en tierra y deformaciones horizontales.

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y CONSIDERACIONES

Algunas de las principales conclusiones, recomendaciones y consideraciones son:

- Los métodos clásicos de cálculo de pantallas poseen simplificaciones y adoptan hipótesis que los alejan del verdadero comportamiento real. El uso de estas medidas simplificadoras aporta fiabilidad gracias a

las hipótesis conservadoras que intervienen en el proceso de cálculo y que se reflejan en los factores de seguridad.

- En el ámbito profesional, es poco frecuente el uso de programas de elementos finitos en la modelación de excavaciones profundas o en otro tipo de problemas geotécnicos. Por la experiencia del autor, es bastante común que los estudios de suelos y cimentaciones no dispongan de los recursos para medir en campo

o laboratorio los parámetros de deformabilidad; módulo de elasticidad y relación de Poisson, lo cual obligó en algunos casos a la correlación de éstos con base en otras variables o a partir de referencias bibliográficas.

En la práctica, sólo se trabaja con parámetros de resistencia no drenada (C_u) y no es habitual obtener los parámetros de resistencia en términos de esfuerzos totales y efectivos. En resumen, se puede concluir que es muy importante determinar E y ν , pues son parámetros básicos en la aplicación de un programa de elementos finitos.

- Los métodos de equilibrio límite y empíricos proporcionan una alternativa sencilla y rápida de verificación de resultados e idea de orden de magnitud con respecto a los resultados de la metodología más sofisticada de elementos finitos.
- El tema de los movimientos alrededor de las excavaciones es importante debido a las consideraciones legales por falla de estructuras vecinas. En arcillas blandas a media los movimientos máximos son una función de factor de seguridad contra la falla de base. Las deformaciones varían entre 0,50 % H para $F_s > 2,0$ a 2 % H , para $F_s < 1,2$.
- Los modelos numéricos permiten estimar deformaciones, optimizar procedimientos constructivos, calcular la seguridad de las etapas y estimar solicitaciones en la pantalla.
- Las cuñas de falla obtenidas por métodos analíticos y elementos finitos no son idénticas pero mantienen una buena similitud. Las principales diferencias se deben a cambios en la distribución de esfuerzos, efectos locales o simplificaciones de los métodos analíticos.
- El análisis de esfuerzos y deformaciones en el espaldar de la pantalla permite deducir que las presiones de tierra de carácter activo comienzan a actuar desde los primeros momentos de la excavación. Sin embargo, en la zona del espaldar y bajo la cota de excavación existen diferencias con respecto a las predicciones de los métodos de equilibrio límite, pues las presiones de tierra se mantienen más cercanas al estado de reposo, por lo que un aumento de empotramiento de la pantalla no contribuye a un incremento de seguridad significativo.
- Con la modelación por etapas de los casos de estudio, pudo observarse que los esfuerzos ho-

rizontales disminuyen a medida que avanza la excavación.

- a) La metodología propuesta por Peck (1969) presenta las siguientes limitaciones que deben considerarse: el método presenta envolventes de presiones de tierras para sólo dos tipos de suelos y se desarrolló para análisis de soportes laterales temporales de excavaciones y para materiales arenosos, supone que la excavación está por encima del nivel freático abatido y que hay un descenso significativo del nivel freático detrás del muro.
- b) Las presiones de tierra estuvieron próximas a las presiones de Rankine en todos los casos estudiados, pero en los últimos metros de empotramiento las presiones laterales calculadas numéricamente estuvieron cercanas a la presión en reposo o fueron superadas ligeramente.
- c) Los valores de desplazamiento se ajustaron bastante bien con los criterios establecidos en la parte inicial del capítulo 7; sin embargo, no se logró un ajuste más cercano a los valores registrados en la campaña de instrumentación seleccionada.
- d) Aunque el modelo MH es considerado por los expertos como una aproximación de primer orden, puede ser muy útil si las etapas constructivas de la modelación son consecuentes con el desarrollo de la obra y quizás más aún si existe articulación entre la programación de ensayos y la modelación que se pretenda realizar.

Para futuras investigaciones, hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Se considera que modelaciones físicas (modelos a escala) con un adecuado sistema de automatización de instrumentos, pueden emplearse para verificar o calibrar modelos numéricos que apliquen las metodologías de los elementos finitos.
- Con respecto a los programas de instrumentación o proyectos investigativos, se propone emplear otros dispositivos de control de empujes del terreno sobre las pantallas, como la combinación entre celdas de carga y celdas de deformación instaladas dentro de la estructura. Con estos resultados directos se podría deducir la distribución de empujes del terreno sobre la pantalla y compararlos con los modelos numéricos y teóricos habituales, además de que pueden utilizarse como puntos de control o referencia.

- Para resolver problemas geotécnicos, y la consecuente predicción del comportamiento del suelo, se requieren tres elementos:
 - a) Modelos que describan el verdadero comportamiento del suelo.
 - b) Métodos para evaluar parámetros requeridos del suelo.
 - c) Procedimientos computacionales para aplicar el modelo a problemas prácticos y verificación de algunos de sus resultados con métodos de equilibrio límite.

Agradecimientos

El autor agradece a las firmas Ingeniería y Geotecnia Ltda., Geotecnia y Cimentaciones y Salazar Ferro, por facilitar la información de sus proyectos y los resultados de instrumentación geotécnica. También le da las gracias al ingeniero José Vicente Amórtegui por su dirección y cooperación.

REFERENCIAS

- Bowles, J.E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). Illinois: McGraw-Hill, pp. 185,190.
- Das, B.M. (2006). *Principios de ingeniería de cimentaciones* (5.^a ed.). México: Thomson, pp. 90-150.
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: Prentice Hall, pp. 185-200.
- Lizcano, A. (2004). *Modelación física y numérica de un tablestacado*. Memorias del X Congreso Colombiano de Geotecnia y V Seminario Colombiano de Geotecnia. Paipa: Sociedad Colombiana de Geotecnia, 10-13 de agosto, pp. 333-340.
- Moya Barrios, J.E. (1987). *El subsuelo de Bogotá y los problemas de cimentaciones*. VII Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Fundaciones. Cartagena: Sociedad Colombiana de Geotecnia, pp. 197-264.
- Moya Barrios, J.E. et al. (2010). *Excavaciones en condiciones complejas* (2.^a ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, pp. 5-170.
- Moya Barrios, J.E. (2007). *Notas de clase de estructuras de contención*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, pp. 1-40.
- Rocscience (2010). *Manual de Phase 2, versión 6.0*, Toronto. Disponible en www.rocscience.com/downloads/phase2/webhelp/tutorials/Phase2_Tutorials.htm.

Propuesta de diseño del plan de gestión de residuos sólidos peligrosos y no peligrosos para contratistas operativos del sector de hidrocarburos durante la etapa de explotación en el área de mantenimiento eléctrico, locativo y de tanques API que trabajan en el municipio de Aguazul (Casanare)

Design proposal for hazardous and non hazardous solid waste management plan for contractors from the oil industry during the exploitation phase in the locative, electrical, and API tanks maintenance areas operating in the municipality of Aguazul (Casanare)

WILMAN GIOVANNI CUCAITA PACHECO

Ingeniero geólogo de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

wilman.cucaita@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 10/05/2016 Aceptado: 08/09/2016

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

Resumen

En este proyecto se presenta el diseño del plan de gestión de residuos sólidos peligrosos y no peligrosos para las empresas contratistas del sector de hidrocarburos durante la etapa de explotación en el área de mantenimiento eléctrico, locativo y de tanques API del municipio de Aguazul (Casanare). Además, se hace un diagnóstico de la situación en cuanto al manejo de estos residuos, al tiempo que se construye una matriz de aspectos e impactos ambientales, la cual determina que el diseño del plan de gestión de residuos es el control operacional que se debe implementar para minimizar los impactos que producen los residuos y luego se clasifican los residuos por áreas para determinar las cantidades, características, almacenamiento, separación en la fuente y disposición.

Así mismo, se presentan un plan de capacitación y un plan de contingencias para atender una emergencia producida por el manejo de los tipos de residuos. Finalmente, se muestra un conjunto de indicadores que permiten evaluar la gestión del plan que se ha diseñado. El mayor inconveniente se registró en la toma de información, debido a los altos niveles de confidencialidad que manejan estas empresas contratistas del sector de hidrocarburos.

Palabras claves: residuos sólidos, residuos sólidos peligrosos, residuos sólidos no peligrosos, plan de gestión, contratistas, mantenimiento, indicadores.

Abstract

This project shows the design for hazardous and non hazardous solid waste management plan for contractors from the oil industry during the exploitation phase, in electrical, locative, and API tanks maintenance area in the municipality of Aguazul (Casanare). Moreover, a diagnosis of the situation regarding the handling of these wastes is run, while building an environmental aspects and impacts matrix, which determines that the design of the waste management plan is the operational control, to be implemented to minimize the impacts produced by waste, then sorting the waste by areas to determine the quantities, features, storage, source separation, and disposal. Likewise, a training plan and a contingency plan for emergency response produced by the handling of the different types of waste is shown. Finally, a set of indicators to assess the management of the designed plan is presented. The biggest drawback was found to be the collection of information, due to the high levels of confidentiality that oil industry contractors have.

Keywords: solid waste; hazardous solid waste; non-hazardous solid waste, management plan; contractors; maintenance; indicators.

INTRODUCCIÓN

El Plan de Manejo Integrado de Residuos Sólidos se ha formulado como instrumento guía que procura dar cumplimiento a la legislación ambiental y permite mostrar resultados de mejoramiento en relación con los problemas asociados al manejo de los residuos sólidos en las empresas contratistas operativas del sector de hidrocarburos en el área de mantenimiento eléctrico, locativo y de tanques API del municipio de Aguazul (Casanare).

En este plan se proponen medidas de manejo con un enfoque preventivo que permitan controlar y minimizar los impactos ambientales evaluados en la matriz de aspectos e impactos ambientales. Para lograr esto, se recomiendan medidas que están regidas bajo un contexto de viabilidad técnica, económica y ecológica, a través de diseños ingenieriles, y la implementación de normas o procedimientos que garanticen la consecución de las metas propuestas en el programa. El programa comprende una gestión de residuos sólidos, en la que se establecen las actividades necesarias para llevar a feliz término los objetivos del programa, contribuyendo en forma adecuada a la solución de este problema y al desarrollo sostenible de las actividades que se realizan en el ámbito institucional.

La formulación del plan partió de un diagnóstico de la situación actual referente al manejo de los residuos sólidos y se obtuvo como producto una lectura integral del manejo actual dado a dichos residuos en las empresas contratistas operativas del sector de hidrocarburos en el municipio de Aguazul (Casanare); posteriormente se formularon las acciones de manejo, las cuales permitieron establecer el marco de actuación en torno a la gestión integral de los residuos o desechos no peligrosos y peligrosos generados, garantizando con esto el cumplimiento de los lineamientos establecidos en la Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos y el Decreto 4741 de 2005, emitido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

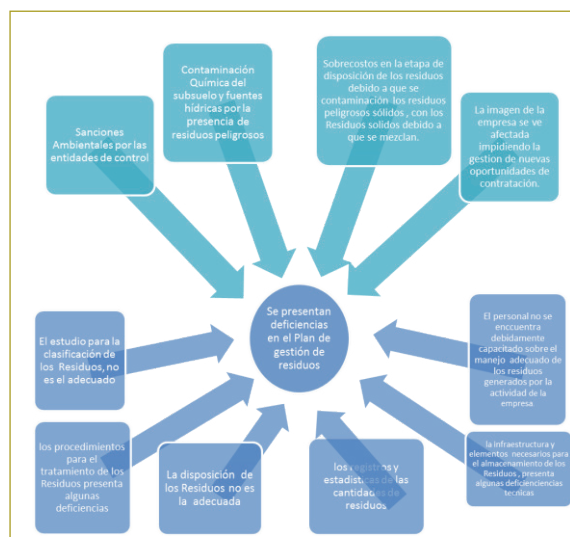
Entre los resultados obtenidos se encuentra un diagnóstico de la gestión actual de los residuos (manejo interno y manejo externo), su clasificación y cuantificación; además, se muestran las opciones de minimización y aprovechamiento, los programas de manejo y los respectivos procedimientos que se pueden utilizar en caso de emergencias, aparte de la ejecución y seguimiento

del proyecto, y finalmente las conclusiones y recomendaciones arrojadas en su desarrollo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las compañías operadoras del sector de hidrocarburos se cree firmemente que un alto desempeño en seguridad, salud ocupacional y ambiente es sinónimo de calidad y efectividad en la operación; las empresas contratistas en el área de hidrocarburos no son ajenas a estos principios y siempre buscan salvaguardar el bienestar de los trabajadores, teniendo en cuenta la convivencia en armonía con la comunidad y el medio ambiente.

Considerando estas premisas se requiere identificar las causas por las cuales es clave un plan de gestión de residuos, para lo cual se utilizó el árbol de problema, que arrojó resultados como falta de control sobre la clasificación, tratamiento, almacenamiento y disposición de residuos peligrosos y no peligrosos; en este árbol se identifican las consecuencias en cuanto a sanciones ambientales, sobrecostos por la disposición de residuos peligrosos y no peligrosos, deterioro de la imagen de la empresa por la falta de gestión de los residuos, y además se tienen problemas con la comunidad por contaminación de fuentes hídricas y subsuelo con este tipo de residuos. La representación del árbol del problema es la siguiente:



Árbol del problema.

Fuente: Elaboración del autor.

Clasificación de los residuos

La cantidad de residuos de este tipo de empresas depende de las actividades de operación y funcionamiento que se realicen. Además, para catalogar los residuos peligrosos se tomó como base el anexo 1 del Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005. Teniendo en cuenta esta situación se analizaron las cantidades y tipo de residuo con el fin de poder formular alternativas para su disposición.

- La primera área de mantenimiento fue la de tanque API, en la cual se tomaron los siguientes datos de cantidades en peso generadas en un mes.

Tabla 1

Cantidad y tipo de residuos generados en mantenimiento de tanques API

Tipo de residuo	Peso (kg)/mes
Reciclable	130,63
Peligroso	0,46
Total	131,09

Los resultados parciales señalan que el 100 % de los residuos generados son reciclables o aprovechables. La generación de residuos sólidos peligrosos tiene un peso de 0,46 kg/mes, valor despreciable si se considera el total de los residuos producidos.



Figura 1. Distribución de residuos generados en el mantenimiento de tanques API.

- La segunda área de mantenimiento analizada fue la de mantenimiento locativo, en la cual se generan tres tipos de residuos, también tomados en kg/mes.

Tabla 2

Cantidad y tipo de residuos generados en mantenimiento locativo

Tipo de residuo	Peso (kg)/mes
Reciclable	3,73
Peligroso	5,903
Escombros	1
Total	10,633

Los resultados parciales señalan que el 56 % de los residuos sólidos son peligrosos, el 35 % son reciclables y el 9 % son escombros; también es importante aclarar que es el mantenimiento en el cual se generan grandes cantidades de residuos peligrosos debido a que se mezclan trazas de pinturas, disolventes y resinas con trozos de tela, brochas y recipientes.

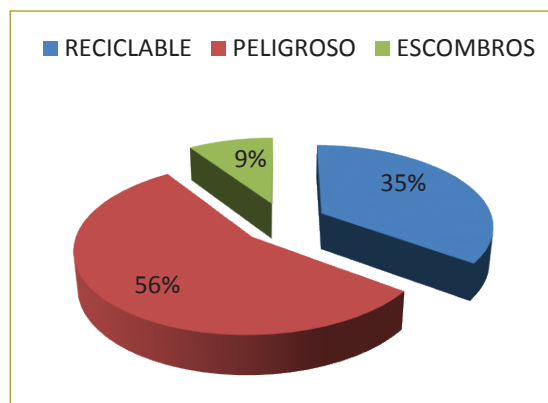


Figura 2. Distribución de residuos generados en el mantenimiento locativo.

- La última área que se analizó fue la de mantenimiento eléctrico, teniendo en cuenta los siguientes datos:

Tabla 3

Cantidad y tipo de residuos generados en el mantenimiento eléctrico

Tipo de residuo	Peso (kg)/mes
Reciclable	3,28
Peligroso	0,263
Total	3,543

Los resultados parciales señalan que el 93 % de los residuos son reciclables o aprovechables y el 7 % de los residuos son peligrosos. Del total de los residuos generados en los mantenimientos eléctricos, éste presenta el menor nivel de generación en comparación con anteriores mantenimientos.

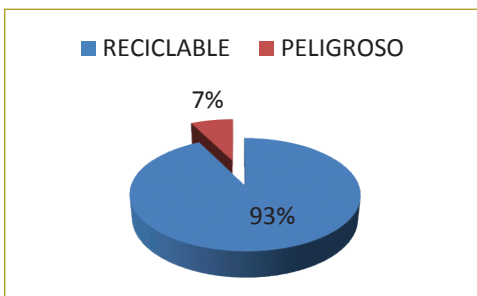


Figura 3. Distribución de residuos generados en el mantenimiento eléctrico.

Los resultados finales de la clasificación de residuos arroja que se generan 137,64 kg/mes de residuos reciclables, 6,62 kg/mes de residuos peligrosos y 1 kg/mes de escombros, durante todas las actividades de mantenimiento de tanques API, locativo y eléctrico, de lo cual se puede concluir que el 80 % de los residuos son aprovechables y el 20 % tienen una disposición especial.

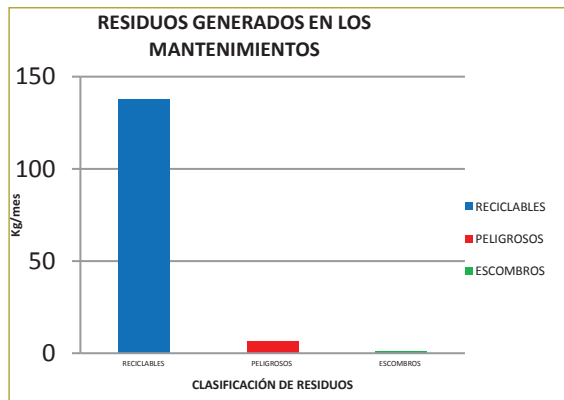


Figura 4. Distribución de residuos generados en el mantenimiento eléctrico.

Definición de responsabilidades

Las acciones del manejo interno de los residuos sólidos se representan a través de un cuadro de responsabilidades, que se asocian a las acciones intermedias y finales del programa de manejo de residuos; para tales acciones se debe establecer una programación genérica respectiva:

Tabla 4
Cuadro de responsabilidades

OPERACIÓN	QUIÉN	QUÉ	DÓNDE	CÓMO	CUÁNDO
Dotación de los materiales necesarios para la clasificación y separación de residuos	Encargado de la gestión del programa de manejo de residuos sólidos	Recipientes Bolsas Puntos ecológicos	Todas las áreas, tanto administrativas como operativas, de las empresas	Atendiendo los requerimientos	Mensual
Separar y empaquetar los residuos de acuerdo con la clasificación establecida	Todo el personal de la empresa: operativos, administrativos, visitantes y contratistas	Separar correctamente los residuos: peligrosos y no peligrosos	En todas las áreas de las empresas	Colocando cada clase de residuo en el recipiente correspondiente	En el momento de generar y descartar un residuo
Almacenar los residuos de acuerdo con la clasificación establecida	Personal de limpieza o designados para esta función	Residuos peligrosos y no peligrosos	En todos los servicios operativos y administrativos	Colocando las bolsas con residuos en las canecas, de acuerdo con su clasificación	Las veces que sea necesario en el día
Transporte de residuos en caso de estar en campo	Operarios de campo a cargo de los respectivos mantenimientos	Transportar los residuos generados desde el punto donde se realiza el mantenimiento hasta la sede principal de la empresa contratista	En todos los servicios operativos de mantenimiento	En un vehículo adecuado para el transporte de residuos	Semanal
Recolección y transporte externo de residuos no peligrosos	Empresa prestadora de servicio de aseo	Residuos no peligrosos	Cuarto de almacenamiento de residuos	Con vehículos para transporte de residuos no peligrosos	Semanal
Recolección y transporte externo de residuos peligrosos	Empresa especializada en recolección y disposición de residuos peligrosos	Residuos peligrosos	Cuarto de almacenamiento de residuos	Con vehículos para transporte de residuos peligrosos	Mensual o dependiendo de la cantidad de residuos que se generen

Fuente: Autor.

Medidas para la separación de residuos

En el almacenamiento y la separación de residuos se contempla el uso de canecas grandes, identificadas debidamente con los colores establecidos por la Guía Técnica del Icontec GTC 24, para la separación en la fuente (Icontec 2009). Para la separación se deberán emplear canecas grandes, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

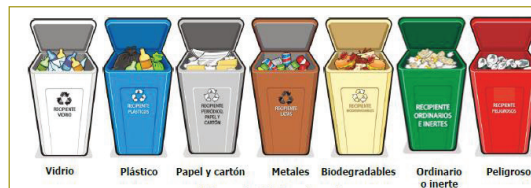


Figura 5. Canecas para disposición de residuos.

Fuente: Manual para el manejo de residuos en el valle de Aburrá.

Las canecas deberán estar claramente demarcadas, estableciendo el tipo de residuo.

- Caneca gris: residuos de papel, cartón, plegadizas, archivo y periódicos.
- Caneca crema: residuos de alimentos, desechos de jardín, desechos de frutas.
- Caneca azul: vasos plásticos desechables, bolsas de empaques, envases de plásticos.
- Caneca: vidrios.
- Caneca verde: residuos sanitarios.
- Caneca naranja: metales.
- Caneca para EPP color café (propuesta).
- Caneca morada: residuos peligrosos (determinada por el autor).

Capacitación ambiental en residuos

Para un buen desarrollo del plan de gestión de residuos sólidos se plantea como base la capacitación del personal en todos los niveles, con el fin de garantizar el cumplimiento de los objetivos del programa.

A renglón seguido se presenta un formato para la caracterización del programa en el que se identifican los aspectos más importantes de la capacitación ambiental:

Tabla 5
Caracterización del programa de capacitación

PLAN DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS								
FORMATO		VIGENCIA: DD/MM/AA	VERSIÓN: V	Código: XXXX-01	Página de			
Capacitación Ambiental en Manejo de Residuos								
PROBLEMA	ESTRATEGIA	ALCANCE	META	ACCIÓN	LINEA DE ACCIÓN			
					RESPONSABLE	INDICADOR	MONITOREO	RECURSO
Las actividades de capacitación realizadas en la empresa son insuficientes para lograr un manejo integral de los residuos sólidos	Establecer medidas educativas para la prevención, reducción y control de la contaminación por residuos sólidos en la Empresa	Toda la Empresa	Capacitar al 100% de los trabajadores a través de actividades ambientales que se realizan en la empresa asociadas con manejo de los residuos sólidos, en un periodo de 1 año.	Diseñar las capacitaciones necesarias que se incluirán en el programa de capacitación.	Gerencia Coordinado y HSE	Número de encuestados que responden con un 60% de acierto realizada al la capacitación. Puntaje Auditoría Concepto Colombiano de Seguridad.	Encuestas y auditorías.	Humano Logístico Financiero

Indicadores

A continuación se presentan una serie de indicadores para el control de la destinación y manejo de los residuos sólidos generados por los contratistas operativos del

sector de hidrocarburos, en el área de mantenimiento eléctrico, locativo y de tanques API.

Indicadores de destinación. Se calcula la cantidad de residuos sometidos a reciclaje, disposición en rellenos sanitarios, devoluciones a los fabricantes, empresas especializadas en manejo de residuos peligrosos, dividido entre la cantidad total de residuos generados. El coordinador de HSE calcula los siguientes índices, expresados como porcentajes, y los registra mensualmente.

- Indicador de destinación para reciclaje:

$$DR = RR / RT * 100$$

- Indicador de destinación para rellenos sanitarios:

$$DRS = RRS / RT * 100$$

- Indicador de destinación para otro sistema:

$$Dos = ROS / RT * 100$$

Donde:

DR = indicador de destinación para reciclaje.

RR = cantidad de residuos reciclados en kg/mes.

DRS = indicador de destinación para relleno sanitario.

RRS = cantidad de residuos dispuestos en relleno sanitario en kg/mes.

Dos = indicador de destinación para otros sistemas de disposición final aceptada por la legislación.

Indicador de capacitación. Se establecen los indicadores para hacerle seguimiento al plan de capacitación: número de jornadas de capacitación y número de personas entrenadas.

- Indicador de cumplimiento de capacitación

$$CC = CR/CP*100$$

- Indicador de eficiencia

$$EC=PC/TP*100$$

Donde:

CC= indicador de cumplimiento de capacitación.

CR= capacitaciones realizadas.

CP= capacitaciones planeadas.

CC= indicador de cumplimiento de capacitación.

PC= número de personas capacitadas.

TP= total de personal que se va a capacitar.

CONCLUSIONES

- El análisis de los procesos permite identificar y clasificar los residuos que se generan de éstos, pero esto se vio afectado por las restricciones en el suministro de información relacionada con el funcionamiento de los procesos, sustentada en políticas de confidencialidad de la información de las empresas contratistas operativas del sector de hidrocarburos durante la etapa de explotación, en el área de mantenimiento eléctrico, locativo y de tanques API.
- En la identificación de los residuos sólidos peligrosos y no peligrosos generados en las empresas contratistas operativas del sector de hidrocarburos en el área de mantenimiento eléctrico, locativo y de tanques API, se incluyeron áreas administrativas, operativas internas y externas a las empresas, teniendo en cuenta que el insumo, luego de transformarse o aportar un servicio al proceso, se convierte en residuo, afectando no sólo los tipos de mantenimiento objeto de estudio sino otras actividades, por lo que la identificación se debería hacer considerando el recorrido o ciclo de vida del residuo.
- La clasificación de los residuos sólidos peligrosos y los no peligrosos se realiza mediante una inspección cualitativa, donde se comparan las características de acuerdo con la normativa, pero ésta se ve limitada porque se carece un análisis de laboratorio que compruebe las características para clasificar los residuos sólidos peligrosos y los no peligrosos. También es importante tomar en cuenta que las empresas no cuentan con la infraestructura adecuada para el almacenamiento de los residuos, razón por la cual se mezclan peligrosos con no peligrosos, haciendo que su clasificación sea más dispendiosa.
- La propuesta del plan de gestión está enfocada para que las empresas contratistas puedan tomar medidas de prevención, como los planes de capacitación que deben formularse para asegurar que los miembros de la organización realicen las actividades de una disposición correcta de los residuos, así como el uso racional de los recursos que la organización suministra para disminuir la cantidad de residuos.
- El análisis de los indicadores de gestión que se plantean en el plan de gestión de residuos sólidos

peligrosos y no peligrosos permite a las empresas contratistas evaluar su gestión de residuos, siempre y cuando se alimenten con datos reales; esto les servirá de punto de partida para generar planes de acción para solucionar los problemas de residuos que se estén presentando.

RECOMENDACIONES

- Es importante diseñar un contenedor para disponer los tipos de residuos que se generan en las empresas contratistas del sector de hidrocarburos y que tiene que ajustarse a las condiciones propias de las instalaciones; además, se deben considerar aspectos técnicos como capacidad, material y drenajes, considerando los indicadores que se generan en el programa de gestión de residuos sólidos.
- En el momento de implementar el programa de gestión de residuos sólidos deben hacerse campañas para mejorar la conciencia ambiental general y la capacitación técnica dentro de cualquier tipo de empresa, independientemente de su estructura organizacional, mediante programas que incluyan desde los obreros simples hasta la alta dirección de la empresa.

REFERENCIAS

- Consejo Colombiano de Seguridad (2010). *Guía del Sistema de Seguridad, Salud Ocupacional y Ambiente para Contratistas*. Convenio 170 sobre la seguridad en la utilización de los productos químicos en el trabajo.
- Decreto 4741 de 2005. Por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Gobierno nacional. García Córdoba, F. (2005). *La tesis y el trabajo de tesis*. Editorial Limusa.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (diciembre de 2005). *Política ambiental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos*. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (diciembre de 2005). Decreto 4741, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral. Bogotá.
- Resolución 1016 de 1989, de los Ministerios de Trabajo y Seguridad Social y Salud Pública. Art. 14.
- Sistema Distrital para la Prevención y Atención de Emergencias (SDPAE) (2009). *Guía para elaborar planes de emergencia y contingencia*. Bogotá.

Estudio de viabilidad técnica para la implementación de un puerto de transferencia intermodal en el municipio de Puerto Asís (Putumayo)

Technical feasibility study for implementing an intermodal transfer port in the municipality of Puerto Asís (Putumayo)

MIGUEL HORACIO ROBLES GUERRERO

Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Tránsito y Transporte.

miguel.robles@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 12/05/2016 Aceptado: 10/09/2016

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

Resumen

El municipio de Puerto Asís (Putumayo) cuenta en la actualidad con un sistema de transferencia de carga sobre el río Putumayo, que consiste en una unidad de tipo flotante conocida como muelle La Esmeralda, muelle en operación continua y con un promedio regular de movimiento y transferencia de carga ubicado en la localidad de Puerto La Unión, a tan sólo siete kilómetros aguas abajo de la cabecera municipal. La implementación de un nuevo puerto de carga sobre el río Putumayo, uno de los principales corredores fluviales del país, permitirá consolidar al municipio de Puerto Asís como un centro de transferencia de gran importancia internacional, con miras a estructurar un corredor intermodal bioceánico a través del corredor Tumaco-Mocoa-Puerto Asís-Belém do Pará. El muelle portuario debe ser de tipo multipropósito comercial, en lo posible de naturaleza pública, destinado a dos actividades económicas principales que corresponden al trasiego de hidrocarburos y la transferencia de carga general, cuyos sistemas de servicio deben funcionar independientemente pero asociados a la misma plataforma, con capacidad de movilizar, transferir y almacenar un volumen de 323.423,20 toneladas de carga total en el año 2023, de las cuales 69.098,20 toneladas corresponden al movimiento de carga general y 254.325 toneladas, al trasiego de combustibles.

Palabras claves: transferencia de carga, corredor intermodal bioceánico, multipropósito comercial, trasiego de hidrocarburos.

Abstract

The municipality of Puerto Asís (Putumayo) currently has a load transfer system on the Putumayo River; a floating type unit known as Pier La Esmeralda, located in the town of Puerto La Unión just seven (7.0) kilometers downstream from the municipal seat, which is in continuous operation and regular averaging motion and load transfer. The implementation of a new loading port on the Putumayo River, one of the major river corridors in the country, will consolidate the municipality of Puerto Asís as a transfer center of international relevance aimed at structuring an intermodal bi-oceanic corridor through the Tumaco-Mocoa-Puerto Asís-Belém do Pará corridor. The proposed port dock must be a commercial multipurpose one, preferably publicly funded, used for two main economic activities that correspond to the oil transportation and general cargo, whose service systems should function independently but associated to a single platform, capable of mobilizing, transferring, and storing a volume of 323,423.20 tons of total cargo in 2023: 69,098.20 tons for general cargo and 254,325 tons for oil transportation.

Keywords: load transfer; intermodal bi-oceanic corridor; commercial multipurpose; hydrocarbons transfer.

INTRODUCCIÓN

El transporte fluvial en Colombia data de épocas remotas y se realizó especialmente a través de las cuatro hidrovías principales (el río Magdalena, el río Meta, el río Atrato y el río Putumayo), constituyéndose en un medio importante de transporte, comunicación y desarrollo.

Sin embargo, con el paso del tiempo y la implementación de diferentes políticas gubernamentales que incentivaron el transporte en modo terrestre, aéreo y ferroviario, el transporte en modo fluvial perdió relevancia y dejó atrás sus beneficios como ruta natural de conectividad y comercio a bajo costo.

En la actualidad, el transporte fluvial en el país no se explota en una forma debida y adecuada, pues se priorizan y magnifican otros medios de transporte para cuya implementación, aprovechamiento, operación y mantenimiento se requieren grandes inversiones de capital, que si bien ofrecen condiciones aceptables para el ejercicio del transporte, estarán siempre en desventaja en relación con el desarrollo del transporte por modo fluvial, en particular por los costos derivados y asociados al transporte, más aún cuando el país tiene un potencial único de vías fluviales navegables.

Colombia cuenta con más de 18.000 kilómetros de longitud de ríos navegables, de los cuales alrededor de 10.320 kilómetros corresponden a navegación mayor; recorren una gran extensión del territorio del país, representando un pilar de la economía y desarrollo, y en muchas regiones, dada la geografía y la topografía, conforman el único medio de transporte y comunicación.

El departamento del Putumayo, región localizada en el suroccidente del país, en la Amazonia colombiana, integra y forma parte esencial del eje intermodal del Amazonas y de la hidrovía del Putumayo, donde se destaca el corredor fluvial del río Putumayo, que aguas abajo del municipio de Puerto Asís es navegable hacia el suroriente de Colombia y permite la conectividad con países como Brasil, Ecuador, Perú y Bolivia a través de su interacción con otras hidrovías y modos de transporte de la región.

La visión para la implementación de un puerto de transferencia intermodal de carga en el municipio de Puerto Asís es el resultado de un diagnóstico actual del sistema de transporte intermodal sobre el río Putumayo, donde básicamente se vienen desaprovechando no sólo las bondades hídricas y de navegabilidad del corredor fluvial, sino que además se desestima el potencial global

comercial y de negocios que se avecina en la región, con miras a la implementación del eje intermodal del Amazonas, que permitirá la interconexión bioceánica entre el océano Pacífico y el océano Atlántico, que a su vez constituirá un polo de desarrollo regional, nacional e internacional.

Con esto se pretende hacer el estudio técnico que conduzca a obtener el concepto de viabilidad para la implementación de un puerto de transferencia intermodal de carga en el municipio de Puerto Asís, concepto derivado del diagnóstico actual del sistema de transporte sobre el corredor fluvial, la cuantificación y valoración de la potencialidad comercial y visión de negocios del área de influencia, así como las condiciones hidráulicas y de navegabilidad particulares del corredor fluvial sobre el río Putumayo.

MOVIMIENTO PORTUARIO EN EL MUELLE FLUVIAL LA ESMERALDA

El Ministerio de Transporte, por intermedio del Grupo Operativo de Transporte Acuático y la Inspección Fluvial de Puerto Asís, reporta mensualmente el movimiento total portuario en el muelle fluvial La Esmeralda, información que se consolida semestralmente a efectos de control y registro estadístico. Para el desarrollo del presente estudio, se cuenta con información histórica de movimiento portuario a partir del primer semestre del año 2008 y hasta el primer semestre del año 2012.

Se destaca principalmente el volumen portuario de carga movilizada en el muelle fluvial La Esmeralda en el año 2011 (157.028 toneladas), que aumentó en más del 440 % en relación con el volumen portuario del año 2008 (35.618 toneladas). En el primer semestre del año 2012, el volumen portuario alcanzó una significativa cifra de 89.829 toneladas de carga (figura 1).

CARACTERIZACIÓN DE LA CARGA MOVILIZADA EN EL MUELLE FLUVIAL LA ESMERALDA

Para efectos de categorizar, tipificar y clasificar la carga movilizada en el muelle fluvial La Esmeralda, se ha determinado tener presentes única y exclusivamente los registros de carga a partir del año 2008, para caracterizar y categorizar la tipología y naturaleza de carga transferida, que corresponde a periodos de máxima movilización

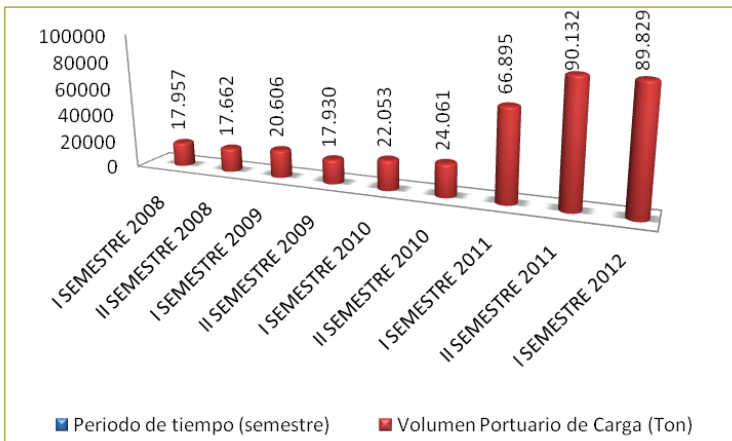


Figura 1. Movimiento portuario semestral en el muelle fluvial La Esmeralda.

Fuente: Elaboración propia, a partir de los registros del informe de labores de la Inspección Fluvial de Puerto Asís.

ción, en los que es notorio el aporte de la producción petrolera al volumen de carga transferido en el muelle.

Aunque la Inspección Fluvial de Puerto Asís cuenta con datos históricos de movimiento de carga desde el año 2008, su análisis muestra que la transferencia de carga en el muelle fluvial La Esmeralda experimentó un ascenso significativo a partir del año 2011, marcado por la gran influencia de transporte de hidrocarburos y, en menor medida, por el comercio de carga general.

El comercio de carga general experimentó un aumento considerable en el periodo comprendido entre los años 2008 y 2010, pero dicha tendencia sufrió una desaceleración en el periodo 2011 y en el primer semestre de 2012 (tabla 1).

La desaceleración o decrecimiento en las cifras de movimiento de carga general disminuyó durante los años 2011 y 2012, muy probablemente por la inseguridad

sobre el corredor fluvial del río Putumayo; los transportadores manifiestan continuamente su preocupación por las acciones militares que se efectúan en esta zona del país, al igual que por los constantes atropellos, intimidaciones y extorsiones a las cuales son sometidos, en particular en las zonas del corredor fluvial donde la presencia de los organismos de seguridad del Estado es baja o inexistente.

En el muelle La Esmeralda se presenta una curiosa particularidad del movimiento de carga; mientras que en los últimos años el transporte de hidrocarburos aumenta considerablemente, disminuye sensiblemente el transporte de carga general, probablemente a causa de condiciones específicas de la región, como orden público y seguridad fronteriza, problemas de navegabilidad del río Putumayo y una creciente desaceleración económica (figura 2).

Los registros mensuales de labores de la inspección fluvial de Puerto Asís para el muelle La Esmeralda en el 2001 indican que se movilizó un total de 157.028 toneladas de carga, de las cuales el 93,04 % corresponde a transporte de hidrocarburos y el 6,96 %, a carga general.

CAPACIDAD DE NAVEGACIÓN Y TRANSPORTE DE LA HIDROVÍA DEL RÍO PUTUMAYO

Para obtener el valor de la capacidad de navegación y transporte del río Putumayo, se ha determinado tomar como referencia del proceso de cálculo la primera edición del texto *La navegación y el transporte fluvial en Colombia*, del autor Joaquín Moreno Gómez, en el que se define que “la capacidad potencial de transporte de los ríos estaría representada en el número de convoyes o embarcaciones que podrían estar navegando en un trayecto de río, sin llegar a su nivel de saturación del tráfico,

Tabla 1
Movilización anual de carga en el muelle fluvial La Esmeralda (cifras en toneladas)

PRODUCTO DE CARGA	2008	2009	2010	2011	2012 (I semestre)
Carga general (t)	23.923,69	28.816,20	30.826,42	23.143,21	11.959,29
Hidrocarburos (t)	11.694,58	9.719,24	15.288,03	133.884,39	77.869,26
TOTALES	35.618,28	38.535,44	46.114,45	157.027,60	89.828,55

Fuente: Elaboración propia, a partir de los registros del informe de labores de la Inspección Fluvial de Puerto Asís.

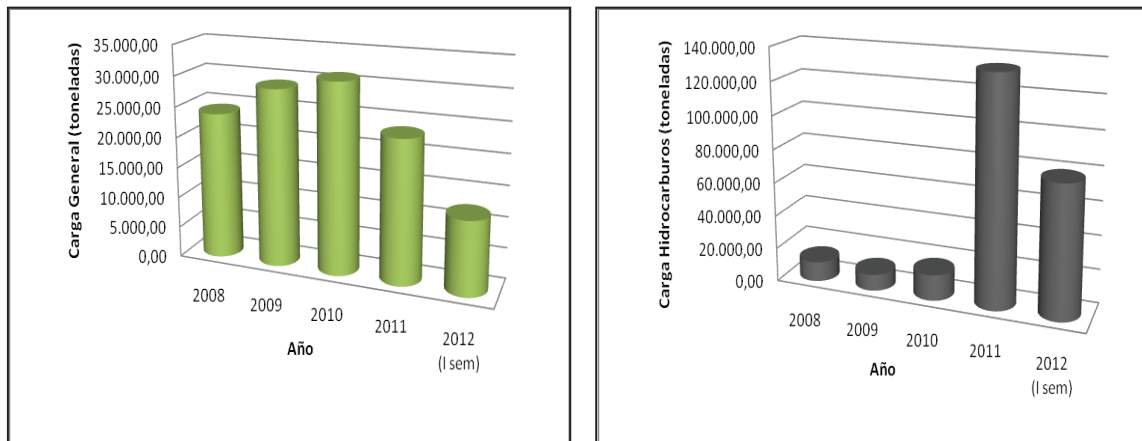


Figura 2. Movilización anual de carga general e hidrocarburos en el periodo 2008-2012.

Fuente: Elaboración propia, a partir de los registros del informe de labores de la Inspección Fluvial de Puerto Asís.

multiplicado por el número de toneladas transportadas por los convoyes o embarcaciones, en un periodo de tiempo determinado”.

Como fórmula de cálculo, se adoptará la expresión para la obtención de la capacidad potencial anual de transporte de la hidrovía, de acuerdo con el procedimiento seguido para el cálculo de la capacidad de transporte del río Meta, en desarrollo del trabajo elaborado por el ingeniero Moreno Gómez para la Unión Temporal Econometría - Cal y Mayor:

$$CTR = \frac{LR}{EC + DEC} \times CC \times NEF \times \frac{Fh}{T} \times Ci \times Ks \times Ke \times Re$$

Donde:

- CTR = capacidad potencial anual de transporte de la hidrovía (toneladas).
- LR = longitud de la hidrovía (sector estudiado en metros).
- EC = eslora de la embarcación o convoy típico (metros).
- DEC = distancia entre convoyes o embarcaciones que navegan en el mismo sentido (metros).
- CC = capacidad promedio de las embarcaciones o convoy típico (toneladas).
- NEF = número de embarcaciones que pueden navegar frente a frente o posibilidad de paso (unidad).
- Fh = fondo horario disponible anual (horas/año).
- T = tiempo de recorrido del trayecto (horas).

- Ci = coeficiente de afectación por imprevistos en la navegación (condiciones críticas, etc.).
- Ks = coeficiente de seguridad.
- Ke = coeficiente de exclusión por el tráfico de embarcaciones pequeñas o pasajeros.
- Re = coeficiente de representatividad de la embarcación. Se utiliza la capacidad de la embarcación típica seleccionada por su mayor uso, pero que no es el promedio de las embarcaciones existentes, entonces se toma un factor de representatividad.

En primera instancia, es preciso determinar el sector del corredor fluvial en estudio; pese a que se busca establecer el contexto global de las potencialidades comerciales y de navegabilidad del río Putumayo, con el fin de limitar el tramo en estudio, se ha considerado sectorizar el corredor fluvial existente entre el municipio de Puerto Asís (muelle fluvial La Esmeralda) y el municipio de Puerto Leguízamo, en el departamento del Putumayo.

Las consideraciones que permiten delimitar la longitud de la hidrovía corresponden a la naturaleza cambiante y dinámica del corredor navegable del río Putumayo, teniendo el sector Puerto Asís - Puerto Leguízamo como el de mayores restricciones en cuanto a condiciones hidráulicas y de navegabilidad, lo que constituye el mayor limitante para establecer la capacidad potencial anual de transporte.

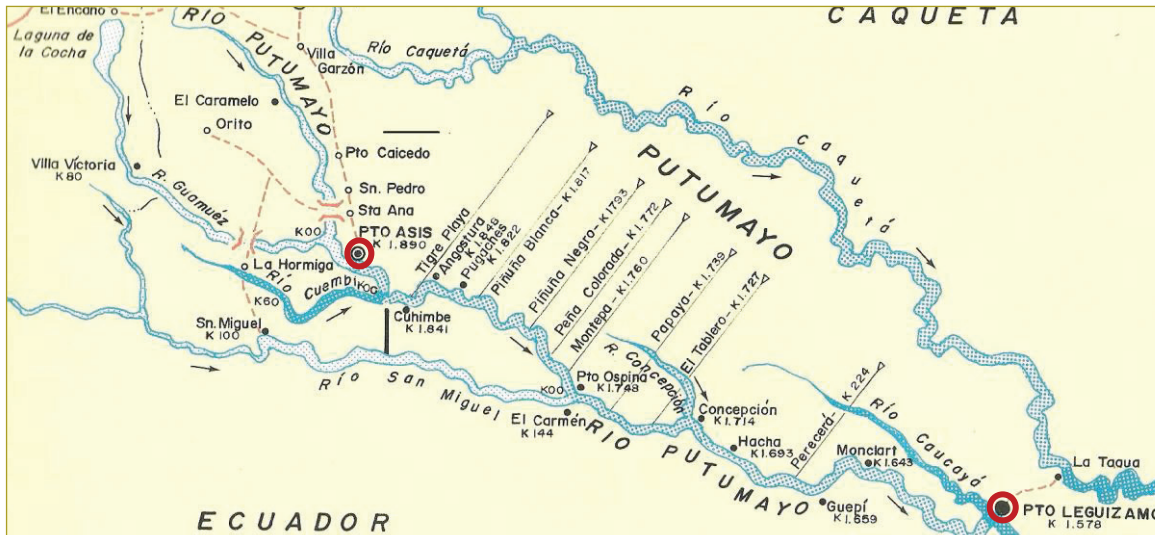


Figura 3. Esquema de canal navegable del río Putumayo, sector Puerto Asís (K1+890) - Puerto Leguízamo (K1+578).

Fuente: *Manual de ríos navegables de Colombia.*

De acuerdo con el *Manual de ríos navegables de Colombia*, elaborado en el año 1989 por la Dirección de Navegación y Puertos del Ministerio de Obras Públicas y Transporte, el canal navegable para embarcaciones mayores del río Putumayo en el tramo Puerto Asís (K1+890) - Puerto Leguízamo (K1+578) tiene una

longitud de 312 kilómetros (312.000 metros), con profundidades de calado en épocas de verano (enero - marzo y julio - septiembre) de entre 4 y 5 pies (1,21 a 1,52 metros) (figura 3).

El tiempo de navegación tomado en remolcador de 29 toneladas de capacidad transportadora, con motor

Tabla 2
Condiciones de navegabilidad del río Putumayo, sector Puerto Asís-Puerto Leguízamo

RÍO PUTUMAYO				TIEMPO DE NAVEGACIÓN		TABLA DE CALADOS	
SECTOR: PUERTO LEGUÍZAMO - PUERTO ASÍS				SUBIENDO Julio a sep- tiembre	BAJANDO	INVIERNO	VERANO
NAVEGACIÓN MAYOR Octubre a diciembre						Abril a junio Octubre a diciembre	Enero a marzo Julio a septiembre
DE	A	DISTANCIA (km)	DISTANCIA ACUMULADA (km)	HORAS	HORAS	PIES	PIES
PTO. LEGUÍZAMO	MONCLART	65	65	11	6	8,5	5
MONCLART	GÜEPÍ	16	81	3	2	9,0	5
GÜEPÍ	EL HACHA	34	115	6	4	8,5	5
EL HACHA	CONCEPCIÓN	21	136	4	2	8,5	5
CONCEPCIÓN	PTO. OSPINA	34	170	6	4	8,5	5
PTO. OSPINA	PIÑUÑA BLANCA	69	239	11	5	7	4
PIÑUÑA BLANCA	PTO. ASÍS	73	312	14	9	7	4
TOTAL		312	312	55	32	-	-

NOTA: Los tiempos de navegación se tomaron en un remolcador de 29 toneladas de capacidad transportadora, con motor de 78 hp.

Fuente: *Manual de ríos navegables de Colombia.*

de 78 hp, se estima en 55 horas subiendo y 32 horas bajando.

A continuación se transcribe parcialmente información sobre el corredor fluvial navegable del río Putumayo, referente a condiciones de navegabilidad, como puertos principales, lugares de atraque, distancias y tiempos de navegación y calados para el sector Puerto Asís - Puerto Leguízamo (tabla 2).

El cálculo de la capacidad de navegación y transporte de la hidrovía del río Putumayo se obtuvo considerando cada una de las variables independientes de la expresión de cálculo de CTR, tal como se muestra a renglón seguido:

LR	=	312.000 metros
EC	=	24 metros
DEC	=	1200 metros
CC	=	500 toneladas
NEF	=	1,5 embarcaciones
Fh	=	1800 horas/año
T	=	32 horas
Ci	=	0,80
Ks	=	0,50
Ke	=	0,50
Re	=	0,60

De este modo se obtiene una capacidad de transporte (CTR) de la hidrovía en el sector Puerto Asís - Puerto Leguízamo, que asciende a 1.290.441 toneladas/año, equivalentes a 716,91 toneladas/hora (calculado para un fondo horario: 1800 horas/año). El coeficiente de utilización de la hidrovía se calcula entonces en un porcentaje de 12,17 % para el año 2011 y de 6,96 % para el primer semestre del año 2012 (tabla 3).

VOLUMEN POTENCIAL DE CARGA

La determinación del volumen potencial de carga es el resultado de un análisis técnico de diferentes indicadores que directa o indirectamente inciden en la estimación de éste, asociados a la oferta y demanda, a las características hidráulicas y de navegación de la hidrovía, las condiciones generales del sistema general de transporte de carga (en este caso, los sistemas fluvial y terrestre) y las particularidades socioeconómicas de la región y el entorno.

Dado que las series históricas de movimiento de carga en el actual muelle La Esmeralda son recientes y presentan variaciones considerables, especialmente en los productos de comercialización (transferencia o trasiego) más representativos, como el petróleo crudo, es necesario limitar el cálculo del volumen de carga a periodos de diseño no muy extensos, con el fin de no incurrir en grandes errores de proyección, producto de la escasa o inexistente información.

Pues bien, pese a que el nivel de información histórica no es el adecuado para efectos de determinar el potencial de carga proyectado y siendo bastante conservadores en los cálculos, se estima un periodo de diseño inicial no mayor de diez años para la plataforma de transferencia de carga, donde básicamente se realizarán acciones de trasiego de hidrocarburos y transferencia de carga general, como maderas, derivados del petróleo y ganadería.

Para efectos de considerar el incremento anual de la carga transportada o transferida, hay que tomar en cuenta dos situaciones ambiguas que ha experimentado el servicio de transferencia de carga en el muelle flu-

Tabla 3
Capacidad de transporte del río Putumayo (CTR), sector Puerto Asís-Puerto Leguízamo

CAPACIDAD DE TRANSPORTE DEL RÍO PUTUMAYO - CTR			
PERIODO	CARGA MOVILIZADA (ton/año)	CAPACIDAD POTENCIAL DE TRANSPORTE - CTR (ton/año)	COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN (%)
2008	35.618,28	1.290.441,00	2,76
2009	38.535,44	1.290.441,00	2,99
2010	46.114,45	1.290.441,00	3,57
2011	157.027,60	1.290.441,00	12,17
2012 (I semestre)	89.828,55	1.290.441,00	6,96
Nota: CTR calculada para el sector Puerto Asís - Puerto Leguízamo (312 km)			

Fuente: Elaboración propia, a partir de los registros del informe de labores de la Inspección Fluvial de Puerto Asís y CTR estimada.

Tabla 4
Cifras de producción de hidrocarburos en el Putumayo

Año / periodo	Producción de hidrocarburos en el departamento del Putumayo (bpdc)	Trasiego de combustibles en el muelle fluvial La Esmeralda (t)	Trasiego de combustibles en el muelle fluvial La Esmeralda (bpdc)	Porcentaje de participación (%)
2009	27.874	9179,24	227,38	0,82
2010	35.636	15.288,03	378,71	1,06
2011	36.770	124.570,73	3.085,80	8,39

Fuente: Elaboración propia, a partir de información del Ministerio de Minas y Energía y el informe de labores de la Inspección Fluvial de Puerto Asís.

vial La Esmeralda en el periodo comprendido entre el año 2008 y el primer semestre del año 2012 (figura 2), mientras que la carga general (principalmente la doméstica) presentó un decrecimiento cercano al 25 % en los años 2011 y 2012 en comparación con los años 2008 a 2010; la carga del sector de hidrocarburos aumentó considerablemente en estos mismos años a niveles superiores hasta en diez veces los registros de trasiego de combustibles del periodo 2008 a 2010.

Esta condición restringe el estudio general del sistema de carga y conduce a la estimación de parámetros diferentes de análisis, dependiendo de la tipología de la carga en estudio, en este caso iniciaremos con el análisis del sector de hidrocarburos, que constituye el mayor aportante en el volumen de carga movilizada en el muelle La Esmeralda.

De acuerdo con Ecopetrol, el potencial petrolífero (crudo y gas natural) de Colombia se estima en más de 47.000 millones de barriles de petróleo equivalente, distribuidos en 18 cuencas sedimentarias que abarcan un área de 1.036.400 km². Alrededor de 82 % de esa área sedimentaria se encuentra disponible para realizar trabajos de exploración y explotación de petróleo y gas natural.

Las cuencas de mayor actividad exploratoria son las de los valles Superior y Medio del Magdalena, Catatumbo, La Guajira, cordillera Oriental, Putumayo y Llanos Orientales.

Los descubrimientos más importantes hechos en Colombia son los de La Cira-Infantas en Barrancabermeja; Chuchupa, en La Guajira; Caño Limón, en Arauca; y Cusiana-Cupiagua, en Casanare.

Los centros de producción petrolera se encuentran en los departamentos del Meta, Casanare, Arauca, Santander, Antioquia, Bolívar, Boyacá, Huila, Tolima, La Guajira, Putumayo y Norte de Santander.

Se estima que la explotación de hidrocarburos en el departamento de Putumayo superará a corto plazo (no mayor a diez años) los 140.000 barriles diarios, convirtiendo la región en una zona de gran potencial, teniendo presente que Colombia alcanzó durante el año 2012 una producción superior a 950.000 barriles por día.

El Putumayo viene acrecentando su producción de hidrocarburos año tras año de la siguiente manera: 27.874 bpdc en 2009; 35.636 barriles en 2010; 36.770 barriles en 2011; 35.055 barriles el año pasado; y un salto de casi 10.000 barriles por día en el primer trimestre de este año, lo cual significa una producción del orden de 44.882 bpdc (tabla 4).

Según la Dirección de Hidrocarburos del Ministerio de Minas y Energía, en el Putumayo durante el primer trimestre del año 2013, se registran las siguientes cifras de producción: en enero 43.547 bpdc, en febrero 45.714 bpdc y en marzo 43.987 bpdc, para un promedio de 44.373 bpdc.

De acuerdo con información suministrada por la regional sur de Ecopetrol, que se encuentra en proceso de consolidación, aproximadamente el 15 % de la explotación petrolera del departamento se ejecutará en el municipio de Puerto Asís, lo cual equivaldría a una producción superior a 21.000 barriles por día calendario (bpdc), de los cuales cerca del 30 % se explotaría en pozos o yacimientos petrolíferos localizados sobre la cuenca del río Putumayo y cuyo transporte se ejecutaría por modo fluvial hasta el muelle La Esmeralda; esto significaría que en un periodo no superior a diez años, alrededor de 6300 bpdc serían objeto de trasiego en la plataforma de transferencia de carga (tabla 5).

Tabla 5
Cifras de producción de hidrocarburos en el Putumayo

Año / periodo	Producción de hidrocarburos en el municipio de Puerto Asís (bpdc)	Trasiego de combustibles en el muelle fluvial La Esmeralda (t)	Trasiego de combustibles en el muelle fluvial La Esmeralda (bpdc)	Porcentaje de participación (%)
No mayor de diez años	21.000	254.325	6300	30,00

Fuente: Elaboración propia.

De cumplirse las expectativas de exploración y producción petrolera en el departamento y en el municipio de Puerto Asís, estaríamos considerando un incremento casi dos veces mayor que el actual movimiento anual de hidrocarburos en el muelle, que representaría 254.325 toneladas anuales de carga potencial.

Con respecto a la carga general movilizada en el corredor fluvial y transferida en el muelle, la situación no es tan alentadora, más aún si nos basamos en el comportamiento estadístico e histórico de carga presentado por la Inspección Fluvial de Puerto Asís, pues no sólo su decrecimiento obedece al desfavorable comportamiento económico de la región, donde las escasas oportunidades laborales y el desempleo afectan el desarrollo comer-

cial, sino que además se ve altamente influenciado por la constante alteración del orden público y las acciones hostiles perpetradas contra transportadores fluviales, en particular por grupos al margen de la ley.

El cálculo y la proyección del potencial volumen de carga general en la plataforma de transferencia de carga del municipio de Puerto Asís se obtuvieron a partir de un análisis estadístico de la serie histórica de movimiento portuario registrado semestralmente en los años 2008, 2009 y 2010. Los datos correspondientes al periodo 2011 - 2012 no se tomaron en cuenta por las razones externas que influenciaron su involución, además de que inciden atípicamente en el comportamiento de las funciones de crecimiento estudiadas.

Tabla 6
Proyección del volumen de carga general en el muelle fluvial La Esmeralda

Rango de datos	Año / Periodo	Volúmen de carga general (ton)	Gráfica de volúmen de carga general en el tiempo - Muelle Fluvial la Esmeralda
1	2008 (I semestre)	11.788,50	
2	2008 (II semestre)	12.315,18	
3	2009 (I semestre)	15.373,12	
4	2009 (II semestre)	13.443,08	
5	2010 (I semestre)	15.287,40	
6	2010 (II semestre)	15.539,02	
7	2011 (I semestre)	10.724,84	
8	2011 (II semestre)	12.418,37	
9	2012 (I semestre)	11.959,29	
10	2012 (II semestre)	18.738,00	
11	2013 (I semestre)	19.473,40	
12	2013 (II semestre)	20.208,80	
13	2013 (I semestre)	20.944,20	
14	2013 (II semestre)	21.679,60	
15	2014 (I semestre)	22.415,00	
16	2014 (II semestre)	23.150,40	
⋮	⋮	⋮	
31	2023 (I semestre)	34.181,40	
32	2023 (II semestre)	34.916,80	

Fuente: Elaboración propia, a partir del informe de labores de la Inspección Fluvial de Puerto Asís.

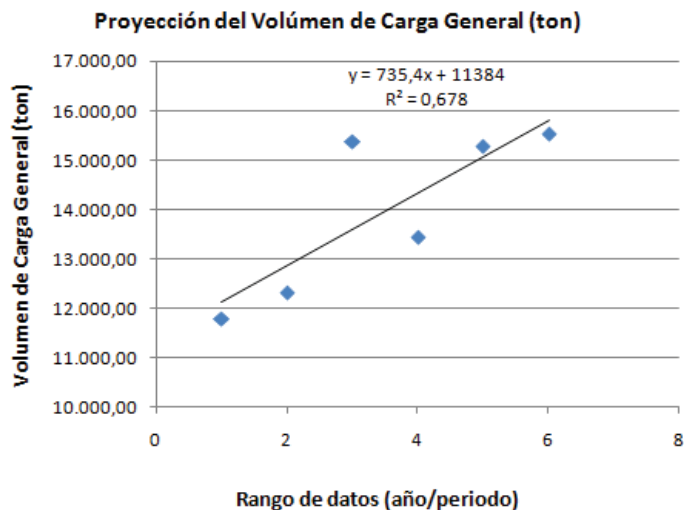


Tabla 7
Movilización y proyección anual de carga en el muelle fluvial La Esmeralda
(cifras en toneladas)

CONSOLIDADO GENERAL DE CARGA EN EL MUELLE FLUVIAL LA ESMERALDA						
PRODUCTO	2008	2009	2010	2011	2012 (I semestre)	2023 (proyectado)
Carga general (t)	23.923,69	28.816,20	30.826,42	23.143,21	11.959,29	69.098,20
Hidrocarburos (t)	11.694,58	9719,24	15.288,03	133.884,39	77.869,26	254.325,00
TOTALES	35.618,28	38.535,44	46.114,45	157.027,60	89.828,55	323.423,20

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, la función lineal fue la que más se ajustó a la serie de datos involucrados en el estudio y permitió, mediante un proceso de extrapolación, considerar un volumen portuario de carga general para el año 2023 del orden de 69.098 toneladas anuales por transferir en la plataforma de carga (tabla 6).

En consecuencia, el volumen total de carga potencial disponible en un periodo de diez años, considerando únicamente las oportunidades comerciales de crecimiento de la carga general y la tendencia de producción del sector de hidrocarburos en la región, estaría alrededor de 323.423,40 toneladas por año (tabla 7), cifra que representaría un coeficiente de utilización de la hidrovía del 25,06 %, calculado sobre una capacidad potencial de transporte del río Putumayo (sector Puerto Asís - Puerto Leguízamo) de 1.290.441 toneladas/año.

La cifra del volumen de carga esperado de 323.423,40 toneladas por año es el resultado de un detallado estudio sobre las condiciones económicas regionales, en el que se priorizó la potencialidad comercial de los productos principales de movilización actual (transporte de hidrocarburos y carga general), al igual que sus proyecciones de oferta y demanda en el tiempo.

Si bien es indudable que con la puesta en marcha de los macroproyectos carretero y de infraestructura fluvial que se llevan a cabo en la región crecerán en forma exponencial los servicios de la plataforma de transferencia, es necesario que se hagan estudios más complejos que permitan determinar en detalle el aporte en volumen que pudiese atraerse por este concepto.

PROPUESTA EN EL ÁMBITO ESQUEMÁTICO DEL PUERTO DE TRANSFERENCIA DE CARGA INTERMODAL

El enfoque básico de la propuesta o alternativa de diseño corresponde a una plataforma de carga de tipo multipropósito comercial, en lo posible de naturaleza pública, destinada al desarrollo de dos actividades económicas principales que corresponden al trasiego de hidrocarburos y la transferencia de carga general, cuyos sistemas de servicio deben funcionar independientemente, pero asociados a la misma plataforma o muelle (figura 4).

La plataforma de transferencia de carga del municipio de Puerto Asís permitirá en su gran extensión el desarrollo de múltiples actividades del servicio intermodal de transporte, que se enmarcaran en dos componentes principales: el componente de carga general y el componente de trasiego de hidrocarburos.

Cada componente del sistema de carga proyectado contará con la infraestructura, superestructura y equipamiento adecuado, que permitirá desarrollar el servicio de transferencia de carga en forma eficiente y segura.

De manera conjunta se integrarán en el diseño propuesto áreas destinadas a servicios administrativos, aduaneros, portuarios y de seguridad, que operen unificadamente en la plataforma, pero que a su vez cuenten con destinación exclusiva, dependiendo de la actividad que realicen o el componente de carga (carga general o hidrocarburos) que atiendan.

Una de las particularidades principales del diseño consiste en integrar la infraestructura existente en el muelle fluvial La Esmeralda a la nueva plataforma de transferencia de carga, de manera que se aprovechen al máximo las inversiones del Estado y se asocien al nuevo esquema, con un criterio de economía y sostenibilidad.

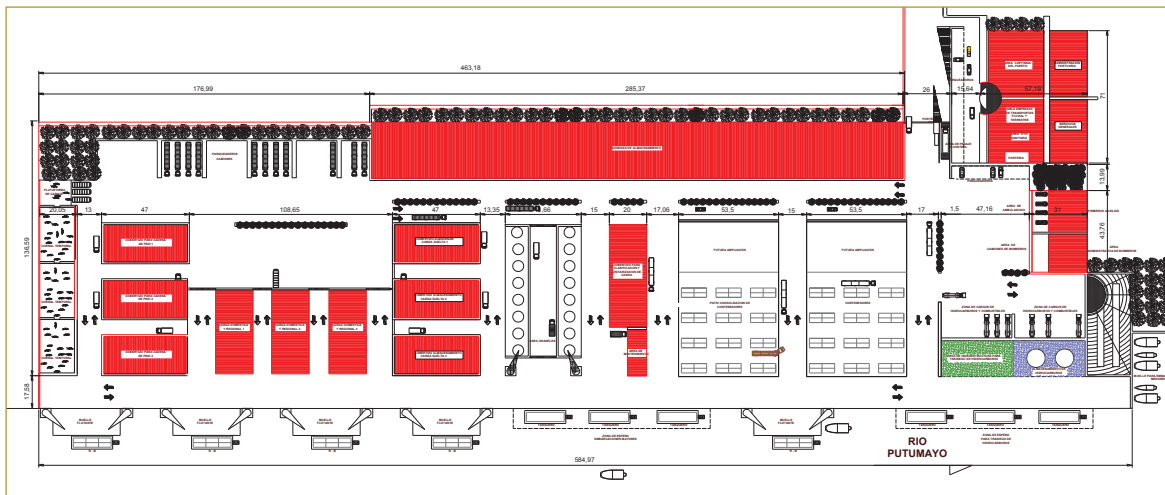


Figura 4. Esquema propuesto para el puerto de transferencia de carga sobre el río Putumayo.

Fuente: Elaboración propia.

El componente de carga de hidrocarburos estará en capacidad de atender la demanda actual de trasiego, en condiciones de continuidad, eficiencia y seguridad, permitiendo satisfacer la demanda proyectada de 254.325 toneladas en el año 2023, que implicarían un movimiento promedio diario de 24 vehículos tipo carrotanque, con capacidad de carga máxima de hasta 30 toneladas.

El componente de carga general estará en capacidad de movilizar no sólo los 5299 TEU previstos de carga en el año 2023, sino que además garantizará el crecimiento esperado de carga con miras al fortalecimiento del corredor bioceánico y la integración fluvial y terrestre del eje del Amazonas, al tiempo que permitirá el desarrollo de las actividades tradicionales de transporte de carga regional e interna.

COMPONENTE DE CARGA DEL SECTOR DE HIDROCARBUROS

El sistema de trasiego de hidrocarburos en la plataforma de carga se diseñó de tal manera que permita la utilización e incorporación de la infraestructura existente en el muelle fluvial La Esmeralda al nuevo esquema de trasiego de hidrocarburos y sus derivados; en esta forma, se contribuye no sólo a la economía en la implementación del sistema, sino que además se permite el aprovechamiento, operación y funcionamiento de la infraestructura existente, sin generar traumatismos al normal proceso de trasiego, mientras se implementa,

construye y edifica la nueva plataforma de transferencia de carga, pues básicamente el área destinada al componente de hidrocarburos se mantiene en el mismo lugar donde opera en la actualidad.

En la superficie destinada para el componente de trasiego de hidrocarburos se tomaron en cuenta aspectos relevantes de diseño, como seguridad, maniobrabilidad, almacenamiento y eficiencia en la prestación del servicio; así las cosas, se implementó un sistema de trasiego con áreas exclusivas de cargue y descargue de hidrocarburos (fluvial y terrestre), almacenamiento, infraestructura y equipos para trasiego, zonas de espera (fluvial y terrestre), zonas de protección especial, seguridad industrial, seguridad operacional y atención de emergencias.

El sector de hidrocarburos permitirá atender de manera unificada y continua tres embarcaciones mayores tipo tanquero y doce vehículos tipo carrotanque; esto garantizará satisfacer la demanda proyectada de forma eficiente y segura, la cual se establece en 697 toneladas de hidrocarburos promedio por día (254.325 t/año - 2023).

El equipamiento, infraestructura especializada y demás logística necesaria para garantizar el servicio de trasiego de hidrocarburos, así como para garantizar su almacenamiento, se deberán seleccionar de conformidad con las condiciones de oferta y demanda, de las capacidades de los equipos de transporte terrestre y fluvial, y de la eficiencia y continuidad requerida

en el proceso, para lo cual se ha dispuesto de áreas exclusivas previstas para su localización, operación y funcionamiento.

Así mismo, se ha previsto la implementación de áreas exclusivas que garanticen la seguridad operacional e industrial del puerto en caso de emergencias, como zona para cuerpo de bomberos y zona asistencial de primeros auxilios, que si bien prestarán sus servicios a toda la plataforma de carga, se localizan en inmediaciones del componente de carga de hidrocarburos por las características propias y el riesgo particular de este tipo de actividad.

COMPONENTE DE CARGA GENERAL

Inicialmente, por efectos de ajuste y facilidad de estimación de los parámetros de diseño, se optó por incluir el concepto de unitarización o contenerización de la carga general, de lo cual se obtuvo que la demanda de carga proyectada para el año 2023 asciende a 5299 TEU; sin embargo, no se mostró en detalle el contexto global del movimiento de carga en la plataforma de transferencia, que si bien se realiza de manera adecuada, óptima y eficiente mediante la consolidación en contenedores, no siempre es posible y generalmente no permite abarcar las tipologías de carga.

En ese sentido, y con el estricto conocimiento de la multivariación de tipos de carga que se manipulan y transfieren en la actualidad en el muelle fluvial La Esmeralda, la proyección de oportunidades comerciales y el análisis detallado de los principales sectores de la economía regional, nacional e internacional, se establecen pautas y lineamientos de diseño que garantizan no sólo la operación actual del muelle, sino que además contemplan la visión de negocios y oportunidades comerciales futuras de la plataforma de transferencia.

El concepto básico de diseño de la plataforma de transferencia consiste en integrar el servicio de carga general de tal forma que se asocien e integren todas las actividades comerciales actuales y estimadas, en condiciones de eficiencia, continuidad y seguridad; por esta razón, se establecen las siguientes áreas exclusivas:

- Área de cargue y descargue de contenedores llenos y vacíos.

- Área de patios de consolidación de contenedores.
- Área para clasificación y unitarización de carga general.
- Área de carga a granel.
- Área para clasificación, almacenamiento y manipulación de carga suelta.
- Área para clasificación, almacenamiento y manipulación de carga doméstica y regional.
- Área para cadena de frío.
- Área para cargue y descargue de carga viva (semovientes).
- Área de almacenamiento y bodegas de carga.
- Área de mantenimiento.
- Área de parqueaderos y zonas de espera de vehículos.
- Área de muelles flotantes para cargue y descargue de mercancías.
- Área y zonas de espera de embarcaciones mayores y menores.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio estuvo orientado a mostrar con mayor claridad la viabilidad de implementar un puerto o plataforma de transferencia de carga en el municipio de Puerto Asís, viabilidad que a nuestro juicio siempre ha estado presente en la región y que tiene su esencia en una posición geográfica de privilegio del municipio de Puerto Asís y el departamento del Putumayo, especialmente cuando se proyecta un corredor intermodal bioceánico a través de la ruta Tumaco - Mocoa - Puerto Asís - Belém do Pará, y su interacción e integración en los ámbitos local, regional y mundial.

Asociados a la particular posición geográfica, se enmarcan elementos potenciales de desarrollo, como intereses internacionales de tipo económico, comercial, ambiental, entre otros, que confluyen en una serie de proyectos de infraestructura que poco a poco articulan una red de comunicación intermodal, encaminados a fortalecer la unificación comercial y el desarrollo económico; de igual manera, la operación actual del muelle fluvial La Esmeralda, registra datos históricos de movimiento anual de carga en constante crecimiento, sobre todo en el proceso de trasiego de hidrocarburos y en menor escala en el movimiento de carga general, constituyendo un indicador más de la necesidad de optimizar el servicio de transferencia de carga en la región.

En conjunto, tales condiciones constituyen indicadores potenciales de viabilidad del proyecto, razón por la cual se analizaron en detalle durante el desarrollo del presente estudio los componentes más relevantes en los contextos global y local del sistema de transporte de carga por los diferentes modos y medios de transporte asociados, en este caso terrestre y fluvial, para estructurar las particularidades generales de implementación de una plataforma portuaria sobre el río Putumayo, que preste servicios de transferencia de carga en condiciones adecuadas de continuidad, seguridad y eficiencia.

El avance en infraestructura ha permitido que el departamento del Putumayo se constituya en centro de importancia comercial para el país, puesto que se ha demostrado con claridad un evidente crecimiento de la actividad económica, particularmente en el proceso de explotación de petróleo crudo, que posiciona al departamento en los lugares de excelencia en la producción nacional, y cuya actividad incide notoriamente en el volumen de carga anual movilizada en el muelle fluvial La Esmeralda; adicionalmente, se incrementa de modo gradual la producción y comercialización de productos agrícolas de la región, como el arroz, la stevia, pimienta, plátano, palmito, chontaduro, fríjol y piña, que sumados a los avances en investigación del sector minero, donde hay amplias expectativas de exploración y producción, convierten al Putumayo, tal como se ha mencionado constantemente, en una región próspera y con gran potencial comercial y financiero.

Posteriormente, la gran inquietud que surgió fue la selección del tipo de puerto o plataforma de transferencia que se debe implementar, en qué condiciones debe operar y si estas garantizan su operación, funcionamiento y sostenimiento en el tiempo; para esto el estudio concluye de manera general, basado en la información recopilada, analizada y procesada, dejando la salvedad de que el alcance no incluye la ingeniería de detalle, que lo ideal y más conveniente es proyectar un dique de tipo vertical, localizado sobre el actual sitio de operación del muelle fluvial La Esmeralda, donde se aprovechen e incorporen las estructuras existentes, preferiblemente construido con obras de naturaleza rígida que cumplan una función dual tanto de aporte a la superestructura del muelle, como al control de inundaciones en la localidad de Puerto La Unión y protección de laderas y taludes del cauce del río Putumayo.

El muelle portuario propuesto debe ser de tipo multipropósito comercial, en lo posible de naturaleza pública, destinado a dos actividades económicas principales que corresponden al trasiego de hidrocarburos y la transferencia de carga general, cuyos sistemas de servicio deben funcionar independientemente, pero asociados a la misma plataforma.

Con respecto al trasiego de hidrocarburos, deberá incorporar, en la medida de lo posible, las estructuras existentes y las obras de infraestructura que en la actualidad lleva a cabo el Instituto Nacional de Vías; así mismo, deberá contar con el equipamiento adecuado para garantizar las condiciones de sostenibilidad, control, seguridad operacional, seguridad industrial y protección ambiental, puesto que es una actividad que genera gran riesgo de contaminación.

Para la operación y servicio de carga general, se insiste en la necesidad de incorporar el concepto de carga unitaria transportada en contenedores normalizados, ya que así se garantiza un servicio más eficiente, ágil y seguro, que influirá positivamente en el servicio y en los costos asociados de transporte. Dado que en la actualidad el transporte y la transferencia de carga general en el muelle fluvial La Esmeralda se realizan sobre carga suelta, sin empaquetar ni embalar, probablemente será muy difícil que el transportador común atienda los requerimientos del puerto de transferencia, no sólo por los costos derivados de dicho trabajo, sino también por el bajo volumen de carga transportada; en tal sentido, el muelle debe disponer al menos durante los primeros años de implementación de un sistema que permita hacer la transferencia en el esquema embarcación - vehículo transportador y viceversa, y que a su vez brinde la posibilidad de consolidar y unificar la carga transportada en contenedores si el transportador fluvial o terrestre así lo desea.

El equipamiento requerido para el servicio de transporte deberá modificarse poco a poco y en la medida de las necesidades, tanto es así que para el transporte fluvial, una vez que se unifique el transporte en contenedores para carga general, las embarcaciones deben contar barcazas apropiadas para este servicio; de igual manera, hay que implementar mecanismos, sobre todo por las empresas dedicadas al transporte de hidrocarburos, para garantizar embarcaciones especializadas con equipos adecuados y cuyas plataformas puedan transportar unidades de contenedores cuando se requiera.

Los equipos de operación en el puerto, especialmente los de cargue y descargue, deberán seleccionarse en forma apropiada, garantizando la continuidad, agilidad, eficiencia y seguridad en el servicio, minimizando al máximo los tiempos de espera y la posibilidad de represamiento de embarcaciones y vehículos de transporte terrestre.

Afortunadamente, la disponibilidad de equipos de transporte terrestre en el departamento es amplia y eficiente, no sólo por los requerimientos especiales de las empresas transportadoras, sino por las condiciones adecuadas de transitabilidad y operación de las vías nacionales en el Putumayo, pues corresponden a corredores viales relativamente nuevos, que se han diseñado y construido siguiendo la normativa, reglamentación y especificaciones técnicas del Instituto Nacional de Vías y el Ministerio de Transporte; claro está, con las debidas restricciones a causa de la topografía montañosa propia de algunas regiones del departamento, particularmente en las vías que conducen a los departamentos de Nariño, Cauca y Huila.

De manera complementaria, el Estado colombiano y las entidades del orden territorial, como el departamento del Putumayo y el municipio de Puerto Asís, deberán priorizar recursos que permitan la ejecución de proyectos de infraestructura vial y fluvial asociados al puerto de transferencia, como la pavimentación del corredor Puerto Asís - Puerto La Unión, y obras de encauzamiento, balizaje, señalización y descolmatación del río Putumayo.

REFERENCIAS

- Ministerio de Transporte de Colombia (s.f.). Grupo Operativo de Transporte Acuático. Inspección Fluvial de Puerto Asís. Informe de labores, movimiento total portuario, desde el primer semestre de 2008 al primer semestre de 2012.
- Moreno Gómez, J. (2007). *La navegación y el transporte fluvial en Colombia* (1.ª ed.). Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, publicaciones e imprenta.
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte de Colombia (1989). *Manual de ríos navegables*. Dirección de navegación y puertos.
- Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de Colombia (2011). *Estadísticas e informes de Comercio Exterior de la Oficina de Estudios Económicos*.
<https://www.mincomercio.gov.co/publicaciones.php?id=47>.

Sistemas hidráulicos de protección contra incendios. Diseño, construcción, operación y mantenimiento

Hydraulic systems fire protection. Design, construction, operation, and maintenance

HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ¹ - ÓSCAR JAVIER RUIZ TÉLLEZ²

1. Profesor titular de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

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

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co - oscar.ruiz-t@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 14/05/2016 Aceptado: 15/09/2016

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

Resumen

En este artículo se presenta un análisis sobre los inconvenientes que hay en Colombia para el diseño, la construcción, la operación y el mantenimiento de los sistemas hidráulicos de protección contra incendios. Durante la investigación se estableció que en el país existe amplia información normativa sobre estos sistemas; sin embargo, aunque es una de las más completas de Suramérica, se evidencian fallas para su aplicabilidad en proyectos de ingeniería.

En una primera instancia se investigó la normativa que rige en el ámbito nacional, particularmente en la ciudad de Bogotá, donde se evidenció que a pesar de que existen el reglamento sismorresistente NSR-10, que en sus capítulos J y K hace referencia a la protección contra incendios, y el Acuerdo 20 de 1995, específico para la capital, se presentan deficiencias a la hora de aplicar los conceptos relacionados con el diseño y la construcción, dejando a criterio de los diseñadores y constructores su implementación, sin contar con entidades oficiales para su acreditación y aprobación.

Lo anterior convalida el objetivo general de este estudio, enfocado en plantear la urgente necesidad de crear una unidad administrativa competente, encargada de revisar y aprobar nuevos proyectos de ingeniería en Colombia, complementada con la capacitación y certificación de técnicos y profesionales en la rama de ingeniería para la protección contra incendios.

Palabras claves: normas, bombas contra incendio, red contra incendio, autoridad competente, operación, inspección, prueba, mantenimiento.

Abstract

This article presents an analysis about the problems that currently exists in Colombia for the design, construction, operation and maintenance of hydraulics systems fire protection.

During the research development, a broad regulatory information on fire protection systems was identified in the country; despite being one of the most complete in South America, failures are evident during its applicability in engineering projects.

Firstly, the regulations governing at the national level and particularly in the city of Bogota were checked, where it became clear that although there exists an “earthquake resistant construction standard NSR-10”, which in its chapters J and K refers to fire protection, and Agreement 20 of 1995, especially for the capital district, deficiencies in applying the concepts in design and construction of systems for fire protection are evident, leaving at the discretion of the designers and builders its implementation, without official governing bodies for accreditation and approval.

This validates the overall objective of this study, which is focused on raising the urgent need to create an administrative unit validated as a competent authority responsible for reviewing and approving new engineering projects on the issue of public security in Colombia, complemented by training and certification of technicians and professionals in the field of engineering for fire protection.

Keywords: standards; fire pump; fire protection system; competent authority; operation; inspection; proof; maintenance.

INTRODUCCIÓN

Un sistema de protección contra incendio mediante redes hidráulicas es fundamental en todo tipo de edificaciones de empresas o industrias para salvaguardar vidas humanas y minimizar las pérdidas económicas producidas por el fuego.

Para determinar las medidas de prevención y protección necesarias que ayuden a reducir los riesgos de incendio en las edificaciones hay que evaluar el grado de riesgo y hacer un seguimiento y control al proyecto desde el inicio del diseño hasta la operación y mantenimiento del sistema, definiendo los mecanismos de control de calidad, las pruebas operativas y los procedimientos que se deben llevar a cabo para su correcto funcionamiento.

En un proyecto de redes hidráulicas contra incendios las pruebas de aceptación y verificación deben estar programadas, incluso, desde el diseño, verificando el cumplimiento normativo, regulatorio y de cubrimiento del riesgo, lo cual es un tema de gran preocupación para las brigadas del cuerpo de bomberos, encargadas de dar auxilio y socorro inmediato, así como para las direcciones de ingeniería, proyectos y prevención de incendios, responsables de inspeccionar y dar los permisos de funcionamiento a ciertos establecimientos, con el fin de evitar dichos eventos.

En lo referente a la normativa, en Colombia existe la norma de diseño y construcción sismorresistente, cuya última actualización se hizo en el 2010, conocida como la NSR-10, que en sus títulos J y K reglamentó el diseño e implementación de las redes contra incendio en las edificaciones del territorio nacional, diferenciando estos sistemas entre secos y húmedos.

En este estudio se hizo un análisis de las normas que rigen esta materia en los ámbitos nacional e internacional, y se analizaron los sistemas hidráulicos de rociadores y de mangueras que se utilizan en edificaciones residenciales, comerciales e institucionales. Con base en esta información se plantean los requisitos, los criterios y las obligaciones de los proyectistas y constructores, así como los lineamientos generales que se deben seguir para la construcción de proyectos de redes contra incendios en el territorio nacional, particularmente en el Distrito Capital.

Teniendo en cuenta que existe una amplia y extensa normativa sobre los sistemas de protección contra incendios en Colombia, en esta investigación se propone

crear un reglamento técnico específico de obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional, así como designar una unidad administrativa que se encargue de hacer cumplir las normas para acreditar y certificar el tema de seguridad pública contra incendio en el país.

MARCO TEÓRICO

Una de las funciones del Estado es preservar la vida de sus ciudadanos y los bienes que poseen, razón por la cual promulga normas que regulan las disposiciones de protección, tanto activas como pasivas, en un marco general. Con base en estas disposiciones legales, los gobiernos locales adaptan la normativa nacional a las particularidades de su zona y legislan de acuerdo con las características propias de su entorno.

En este contexto, actualmente en Colombia se está promoviendo el concepto de “Seguridad humana” en las edificaciones, con el cual se pretende aplicar la normativa existente y crear conciencia y responsabilidad en los profesionales que se dedican a la construcción.

En ese marco normativo, relacionado con sismorresistencia aplicable a la construcción en el país, se define la siguiente estructura normativa:

- Ley 400 de 1997 y Ley 1229 de 2008
- Reglamento NSR-98 de 1998 (derogado)
 - Decreto 33 de 1998
 - Decreto 34 de 1999
 - Decreto 2809 de 2000
 - Decreto 52 de 2002
- Reglamento NSR 10 de 2010
 - Decreto 926 de 2010 (que derogó los decretos 33 de 1998, 34 de 1999, 2809 de 2000 y 52 de 2002)
 - Decreto 2525 de 2010
 - Decreto 092 de 2011
 - Decreto 340 de 2012

Con base en el desarrollo normativo colombiano resulta importante concluir que quienes se dedican hoy en día a la actividad de la construcción en el territorio nacional, y más específicamente los profesionales especializados en el diseño e implementación de sistemas de mangueras y rociadores automáticos en las edificaciones, están obligados a cumplir los lineamientos o requerimientos dispuestos por la NSR-10.

Sin perjuicio de lo anterior y teniendo en cuenta que el Reglamento Colombiano de Construcción Sismorre-

sistente es aplicable y de obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional por parte de los profesionales que se dedican a la actividad constructora, es pertinente aclarar que quienes diseñen y construyan sistemas de extinción contra incendio en las edificaciones del Distrito Capital, además de cumplir con la citada norma, deben acoger los parámetros establecidos en el Acuerdo 20 de 1995.

SISTEMAS DE REDES CONTRA INCENDIO PARA EDIFICACIONES RESIDENCIALES, COMERCIALES E INSTITUCIONALES

Las redes de protección contra incendio en edificaciones residenciales, comerciales e institucionales requieren para su uso un sistema compuesto por almacenamiento, suministro y distribución de agua hasta los puntos más cercanos a las zonas habitadas, en caso de un posible fuego accidental.

Estos sistemas deben estar compuestos por los siguientes elementos:

- Tanque de almacenamiento o reserva de agua.
- Equipo de bombeo.
- Red de tuberías, válvulas y accesorios.
- Sistema de rociadores/sistema de mangueras.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MATERIALES Y ELEMENTOS PARA USO E INSTALACIÓN DE REDES INTERNAS

Actualmente, las especificaciones técnicas de los materiales y elementos que se emplean en Colombia para el uso e instalación de redes internas las establece la firma diseñadora, pero la responsabilidad de su instalación, de acuerdo con la ley, recae en el constructor.

Por otra parte, no existe un organismo estatal encargado de revisar y aprobar los sistemas de protección contra incendio para verificar si los materiales cumplen las especificaciones de fabricación referidas en las normas y determinar si tienen las certificaciones correspondientes.

De igual manera, en Colombia las normas para la instalación de anclajes y soportería de tuberías no siempre son las adecuadas, ya que en algunos casos no se instalan soportes de tipo sismorresistente para la absorción de cargas estáticas y dinámicas a las que queda expuesta la red.

La normativa debe exigir especificaciones dirigidas a establecer los requisitos mínimos que deben cumplir los constructores para la implementación de materiales calificados y certificados, que abarquen las técnicas de fabricación e instalación para los sistemas de protección contra incendio.

ENTREGA, INSPECCIÓN, PRUEBA Y MANTENIMIENTO DE LOS SISTEMAS CONTRA INCENDIO

Estos sistemas de protección sólo actúan en caso de incendio; por tal motivo, requieren un programa periódico de inspección, prueba y mantenimiento que asegure su perfecta operación en ese único evento.

En Colombia, particularmente en Bogotá, no existe un protocolo legal para la entrega de los sistemas de red contra incendio; esto lo hace directamente el contratista al constructor responsable, sin que medie una entidad competente que apruebe dicha entrega.

Además de la entrega formal, los sistemas de protección contra incendio deben contar con un esquema de inspección, prueba y mantenimiento que contemple las revisiones necesarias, aparte de la adecuada formación teórico-práctica del personal a cargo. Mientras no cuenten con un programa de este tipo es como si no existieran, y el principal responsable de su gestión es el propietario de la edificación o su representante.

Una vez que el sistema entra en funcionamiento se debe asegurar que las medidas de protección contra incendio estén activas y siguen siendo adecuadas, razón por la cual es necesario hacer un programa de mantenimiento preventivo.

CONTROL Y SUPERVISIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO

Después de revisar las normas que regulan la implementación de sistemas contra incendio en las edificaciones que existen en el territorio nacional, específicamente en el Distrito Capital, es preciso insistir en que no existe una entidad encargada de hacer un control previo del diseño de estos sistemas y de su entrega.

Este control lo ejercen la Secretaría Distrital del Hábitat y la Unidad Administrativa Especial Cuerpo Oficial de Bomberos de Bogotá, entidades que sólo tienen competencia para realizar dicha labor sólo después

de que el constructor ha entregado las áreas privadas o comunes de las edificaciones y únicamente verifican aquellos inmuebles por los cuales la ciudadanía ha interpuesto alguna queja o cuando una entidad distrital requiere su concepto al respecto. La Unidad Administrativa Especial Cuerpo Oficial de Bomberos de Bogotá puede revisar cualquier tipo de edificación para emitir conceptos técnicos, que simplemente se constituyen como un referente o apoyo, y determinar si un sistema de protección contra incendio cumple con la NSR-98 o la NSR-10 a escala nacional, o en el caso particular de Bogotá, si acatan lo que establece el Acuerdo 20 de 1995, dependiendo de la fecha de expedición de la licencia de construcción. Estas revisiones siempre se realizan a solicitud de los interesados.

De lo expuesto se concluye que, además de no existir una reglamentación clara y precisa sobre seguridad humana y protección contra incendio en Colombia, tampoco hay una entidad competente para verificar el cumplimiento de tales normas y el diseño previo de dichos sistemas, debido a que tanto la norma NSR-10 como el Acuerdo 20 de 1995 están desactualizados y muchos de sus apartes resultan inaplicables, ya que no demuestran la realidad de la destinación de las edificaciones en Colombia, así como las condiciones de riesgo que pueden generarse.

CONCLUSIONES

Como conclusión general se establece que en el análisis de la información a escala nacional de los sistemas de protección contra incendios que utilizan agua existe una amplia y extensa normativa sobre su diseño, construcción, mantenimiento y operación; sin embargo, aún persiste el criterio subjetivo para adaptarlas y aplicarlas, debido a la falta de control y seguimiento que deberían efectuar entidades oficiales para garantizar que los sistemas se diseñen, instalen y entreguen correctamente.

En este estudio, además de mencionar el problema, se incluyeron temas para la planeación, organización y coordinación con que se desarrollan e implementan los proyectos de sistemas de extinción contra incendios y su disposición dentro de las edificaciones residenciales, comerciales e institucionales, particularmente en la ciudad de Bogotá.

Un problema fundamental en el desarrollo de los sistemas de protección contra incendios es la carencia

de formación y capacitación adecuada para aplicar las normas nacionales en sus fases de diseño, construcción y mantenimiento, sin mencionar la falta de actualización de esta reglamentación en Colombia.

Tales deficiencias se han venido superando con la entrada en vigencia de la NSR-98, posteriormente actualizada con la NSR-10, que incluyó aspectos normativos relevantes. Sus capítulos J y K tienen origen en las Normas Técnicas Colombianas (NTC), que a su vez se concibieron con las bases documentales de las normas NFPA (National Fire Protection Association).

Cabe señalar que la expedición del Acuerdo 20 de 1995, mediante el cual se implementó el Código de la Construcción, significó un gran avance en esta materia en el Distrito Capital, en especial las normas contenidas en los capítulos B.2 “Requisitos de resistencia y protección contra el fuego”, B.3 “Medios de evacuación” y D.7 “Sistema de detección y extinción de incendios”.

Si bien las normas colombianas para el manejo de los sistemas de protección contra incendios tienen un buen sustento en los códigos internacionales, su reglamentación es muy incipiente y su incumplimiento no necesariamente se les puede atribuir a los diseñadores y a los constructores. Uno de los principales problemas es la aparente falta de interés por parte del Estado para elaborar un reglamento técnico y de obligatorio cumplimiento, que exija una disciplina normativa sobre la implementación de sistemas de protección contra incendios y de una autoridad estatal que las haga cumplir. Sin embargo, a pesar de las dificultades que se presentan en este aspecto, la normativa existente en Colombia es una de las más completas de Suramérica.

Adicionalmente, debe ser objeto de especial interés la falta de control y vigilancia por parte del Estado para la implementación de este tipo de sistemas, más aún si se considera que las curadurías están encargadas de verificar el cumplimiento de las normas urbanísticas y de las edificaciones vigentes en el distrito o en los municipios, con el fin de expedir las licencias de construcción. Es función de las alcaldías comprobar la aplicación de las normas que rigen esta actividad. Infortunadamente en el país no existe una entidad competente y especializada para verificar el cumplimiento de las normas de protección contra incendios y aprobar previamente sus diseños y construcción.

Así, por ejemplo, en el Distrito Capital “su entrega es posterior y selectiva” y la ejercen entidades como la Secretaría Distrital del Hábitat para edificaciones residenciales y la Unidad Administrativa Especial Cuerpo Oficial de Bomberos de Bogotá.

La Subdirección de Investigaciones y Control de Vivienda de la Secretaría Distrital del Hábitat se encarga de las investigaciones y demás actuaciones administrativas pertinentes cuando existen quejas por el incumplimiento a las normas vigentes por parte de las personas naturales o jurídicas que realizan actividades de construcción de vivienda en el Distrito Capital, entre otros casos por inconsistencias en la construcción de sistemas contra incendios, puesto que no existe obligación legal de tramitar la aprobación de los diseños ante esta entidad y los conceptos técnicos que emiten no son vinculantes o de obligatorio cumplimiento.

Por su parte, la Unidad Administrativa Especial Cuerpo Oficial de Bomberos de Bogotá es un órgano asesor y consultivo que emite conceptos acerca de si los sistemas de protección contra incendios cumplen con las disposiciones normativas que regulan la materia y sólo puede hacerlo sobre aquellos que hayan sido puestos a su consideración o a petición de los interesados.

De acuerdo con lo anterior, es importante destacar la urgente necesidad que hay en el país de expedir un reglamento técnico específico para aprobar los diseños y acreditar la construcción de los sistemas de protección contra incendios. En este reglamento podrían incluirse los anexos y demás normas desarrolladas por la NFPA y otras instituciones internacionales que se encargan de investigar y hacer estudios de ingeniería para el diseño y la construcción de este tipo de sistemas, así como las especificaciones de fabricación de los materiales que se utilizan y sus procesos de certificación.

RECOMENDACIONES

1. Se debe crear y aplicar un reglamento técnico específico, de obligatorio cumplimiento en todo el territorio nacional, para aprobar los diseños y acreditar la construcción de los sistemas de protección contra incendios, avalado por una autoridad competente.
2. Es urgente y necesario crear una entidad estatal que se encargue de vigilar y controlar a las personas naturales y jurídicas que se dedican a la construcción e implementación de sistemas de protección contra incendio a escalas regional y nacional, para que cumplan con dicho reglamento técnico.
3. El diseñador o constructor debe tener conocimiento amplio y suficiente de las normas nacionales, con el fin de tener en cuenta los criterios de diseño y construcción para la implementación de los sistemas contra incendios.
4. Para los proyectos que exijan la implementación de sistemas de redes de protección contra incendios, la curaduría que expida la respectiva licencia de construcción deberá solicitar los diseños aprobados por una entidad competente que certifique el cumplimiento de la normativa vigente por parte del constructor.
5. Requerir una unidad administrativa que cuente con un departamento de proyectos de ingeniería encargado de revisar y aprobar los diseños de los sistemas de redes contra incendios y, además, inspeccionar técnicamente su instalación.
6. Este tipo de sistemas se debe entregar mediante un acta o formato donde se haga una descripción detallada del sistema contra incendio, un inventario de los equipos que lo componen, las pruebas operacionales que aseguren su funcionamiento, un manual de operación y mantenimiento, los planos récord, así como las observaciones que resulten de la primera prueba de operación. En dicha entrega deberá hacerse presente la autoridad competente, con el fin de verificar y certificar su operatividad.
7. Se debe capacitar al personal encargado de la operación, inspección y mantenimiento del sistema, cuyas funciones se pueden realizar periódicamente con la norma internacional NFPA 25 (Norma para inspección, prueba y mantenimiento de sistemas de protección contra incendios a base de agua), sin limitar o restringir el uso de otros programas de inspección, prueba o mantenimiento que proporcionen un grado equivalente del sistema y el funcionamiento para el que se diseñó.
8. Los trabajos de diseño y construcción de sistemas de redes contra incendio los deben realizar empresas calificadas y certificadas, garantizando así su operatividad y correcto funcionamiento.
9. Cada edificación debe contar con un esquema o programa de inspección, prueba y mantenimiento para los sistemas de protección contra incendio, el

cual se puede ejecutar de acuerdo con las frecuencias de tiempo dispuestas en la norma NFPA 25.

10. La responsabilidad para la implementación del esquema de la inspección prueba y mantenimiento será únicamente del propietario o de su representante.

REFERENCIAS

- Ruiz, O. (2016). *Sistemas hidráulicos de protección contra incendios. Diseño, construcción, operación y mantenimiento*. Trabajo de grado para optar al título de magíster en Ingeniería Civil con énfasis en recursos hidráulicos y medio ambiente.
- NFPA 13. Norma para la instalación de sistemas de rociadores, edición 2013.
- NFPA 14. Norma para la instalación de sistemas de tubería vertical y de mangueras, edición 2013.
- NFPA 24. Norma para la instalación de tuberías para servicio privado de incendios y sus accesorios, edición 2013.
- NFPA 25. Norma para inspección, prueba y mantenimiento de sistemas de protección contra incendios a base de agua, edición 2014.
- NFPA 20. Norma para la instalación de bombas estacionarias para protección contra incendios, edición 2013.
- NFPA 22. Norma para tanques de agua para protección privada de incendios, edición 2013.
- NFPA 101. Código de seguridad humana, edición 2012.
- NFPA 5000. Construcción de edificios y código de seguridad.
- NSR 10. Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente.
- NTC 1669. Norma para la instalación de conexiones de mangueras contra incendio.
- NTC 2301. Norma para la instalación de sistemas de rociadores. Acuerdo 20 de 1995. Código de la construcción del Distrito Capital de Bogotá.
- ASME B 16.1. Cast iron pipe flanges and flanged fittings.
- ASME B 16.4. Cast iron threaded fittings.
- ASME B 16.5. Pipe flanges and flanged fittings.
- ASME B 16.9. Factory made wrought steel butt welding fittings.
- ASME B 16.11. Forged steel fittings, socket welding and threaded.
- ASME B 16.21. Non metallic flat gaskets for pipe.
- ASME B 16.25. Butt welding ends for pipe, valves, flanges and fittings.
- ASME B 16.42. Ductile iron flanges and flanged fittings, class 150 and 300.
- ASME B 18.2.1. Square and hex bolts and screws inch series.
- ASME B 18.2.2. Square and hex nuts inch series.
- ASME B 36.10. Welded and seamless wrought steel pipe.
- ASTM A 48. Standard specification for gray iron castings.
- ASTM A 53. Pipe, steel, black and hot-dipped, zinc-coated, welded and seamless.
- ASTM A 105. Carbon steel forgings for piping applications.
- ASTM A 126. Gray iron castings for valves, flanges, and pipe fittings.
- ASTM A 194. Carbon and alloy steel nuts for bolts for high pressure or high temperature service, or both.
- ASTM A 234. Piping fittings of wrought carbon steel and alloy steel for moderate and high temperature service.
- ASTM A 536. Ductile Iron castings.
- ASTM A 743. Standard specification for castings, iron-chromium, iron-chromium-nickel, corrosion resistant, for general application.
- ASTM B 62. Composition bronze or ounce metal castings.
- ASTM D 792. CPVC pipe for fire protection systems.
- AWWA C 906. Standard for polyethylene (pe) pressure pipe and fittings.
- AWWA C 900. Polyvinyl chloride (pvc) pressure pipe and fabricated fittings.
- AWWA C 600. Standard for Installation of Ductile - Iron Water Mains and their Appurtances.
- UL 312. Check valves for fire - protection service.
- UL 262. Gate valves for fire - protection service.
- ANSI / MSS SP-58. Sujetadores y soportes - Materiales, diseño y fabricación.
- UL203. Equipos de soporte de tuberías y servicio de protección contra incendio.
- FM1551. Soporte de tuberías de sistemas de rociadores automáticos.
- Richardson, K. (ed.) (2003). *Historia de la ingeniería de protección contra incendios*. National Fire Protection Association, Quincy, MA.

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

Scope and policy

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

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

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

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

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

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

Ruling for publication

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



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

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

.....

www.4-72.com.co