



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TRABAJO DE GRADO

Propuesta metodológica para la evaluación de la susceptibilidad y socavación de puentes apoyada en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

AUTORES

Germán Giraldo Arenas

Daniel Enrique Vega Castillo

DIRECTOR

Ing. Edgar Eduardo Muñoz Díaz

Bogotá D.C

Noviembre 2013





CARTA DE APROBACIÓN

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “Propuesta metodológica para la evaluación de la susceptibilidad y socavación de puentes apoyada en un Sistema de Información Geográfico (SIG)”, desarrollado por los estudiantes German Giraldo Arenas y Daniel Enrique Vega Castillo, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil, para optar el Título de ingeniero Civil, fue aprobado por:

Ing. Edgar Muñoz
Director de trabajo de grado





Propuesta metodológica para la evaluación de la susceptibilidad y socavación de puentes apoyada en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

German Giraldo Arenas

Daniel Enrique Vega Castillo

La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores-investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.





Contenido

1	INTRODUCCION.....	15
2	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION	16
2.1	REGISTROS HISTÓRICOS DE COLAPSOS DE PUENTES.....	17
2.1.1	Colapsos a nivel mundial	17
2.1.2	Colapsos a nivel Nacional	22
2.1.3	Crisis invernal en Colombia.....	25
2.2	ESTUDIOS REALIZADOS A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL EN EL TEMA DE SOCAVACIÓN.....	28
2.3	SISTEMAS DE ADMINISTRACION DE PUENTES EN EL MUNDO	31
2.4	SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE PUENTES EN COLOMBIA (SIPUCOL)	34
2.4.1	Inventario	35
2.4.2	Inspección Principal	35
2.4.3	Inspección especial.....	36
2.4.4	Capacidad de carga	37
2.4.5	Inspección rutinaria, mantenimiento rutinario y limpieza de puentes	37
2.4.6	Diseño de reparación y refuerzo	37
2.4.7	Priorización de obras de reparación y refuerzo	37
2.5	LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN COLOMBIA	37
2.6	CRISIS INVERNAL.....	39
2.6.1	Impacto del Calentamiento Global.....	39
3	OBJETIVO GENERAL.....	41
3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	41
4	MARCO TEORICO	42
4.1	SOCAVACIÓN.....	42
4.1.1	Definición	42
4.1.2	Formas de Socavación.....	42
4.1.3	Tipos de Socavación.....	43
4.1.4	Socavación local en pilas.....	49
4.1.5	Socavación local en estribos	50
4.1.6	Factores que afectan la socavación en las pilas.....	51
4.1.7	Factores que afectan la socavación local en estribos.....	61
4.1.8	Escalas para la evaluación de la socavación	66



4.1.9	Monitoreo e instrumentación de la socavación	69
4.1.10	Obras de rehabilitación	70
4.1.11	Factores externos que afectan la estabilidad de los puentes	73
4.1.12	Erosión en ríos y corrientes de agua	77
4.1.13	Efectos de la geología.....	82
4.2	CONCEPTOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO	85
4.2.1	Evaluación de riesgos	85
4.2.2	Antecedentes y preparación del análisis	86
4.3	Conceptos básicos de sistemas de información geográfica	87
4.3.1	Componentes de un SIG	87
4.3.2	FUNCIONES DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO	88
5	METODOLOGIA.....	90
5.1	COMPONENTES DE LA METODOLOGÍA DE PRIORIZACIÓN	91
5.2	Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.....	93
5.3	FASE 1 IMPORTANCIA Y VULNERABILIDAD PRELIMINAR	95
5.3.1	Implementación en SIG fase 1	96
5.4	FASE 2 FACTORES DE EROSION, GEOLOGIA Y TIPO DE SUELO (35%) 100	
5.4.1	Implementación en SIG Fase 2	101
5.5	FASE 3 FACTORES CLIMATICOS Y TIPO DE LA CUENCA (60%)	105
5.5.1	Análisis de fase 3 amenaza por tipo de cauce, precipitación e implementación en SIG	105
5.6	FASE 4 LABORES DE CAMPO (50%)	109
5.6.1	Equipos o Herramientas.....	109
5.6.2	Consideraciones de seguridad en la inspección.....	110
5.6.3	Análisis de riesgo ante la socavación obtenido por la visita de campo	110
5.6.4	Formato y guía de Registro en la inspección.....	111
5.6.5	Definiciones y terminología de formato de campo	112
5.7	FASE 5 EVALUACIÓN DETALLADA DE LA SOCAVACIÓN.	127
5.7.1	El estudio topográfico.....	129
5.7.2	El estudio geológico	129
5.7.3	El estudio geotécnico	129
5.7.4	Estudio hidráulico e hidrológico.....	130



5.8	FASE 6 PLAN DE ACCIÓN. (POA)	132
5.8.1	Desarrollo y estructuración de planes de acción	132
5.8.2	Sostenibilidad de los planes de acción	134
6	ANÁLISIS Y VALIDACIÓN	135
6.1	Resultados de inspección visual de un puente	135
6.2	Aplicativo computacional	140
6.3	Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de la vía	146
6.3.1	Fase 1 Importancia y vulnerabilidad preliminar	146
6.3.2	Fase 2 Análisis de factores de erosión, geología y tipo de suelo	157
6.3.3	Fase 3 Factores climáticos y tipo de cuenca	160
6.3.4	Evaluación de riesgo preliminar	163
6.3.5	Labores de campo	165
6.3.6	Evaluación de riesgo total	167
6.4	Validación SIPUCOL	170
6.5	Priorización	173
7	CONCLUSIONES	177
8	Recomendaciones y trabajos futuros	184
9	BIBLIOGRAFÍA	185



LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Colapsos históricos de puentes a nivel internacional Fuente: (Muñoz E. , 2012).....	17
Tabla 2-2 Colapsos históricos de algunos de los puentes por socavación a nivel Nacional Fuente: (Muñoz E. , 2012)	23
Tabla 2-3 Metodologías de priorización de la socavación basado en (Muñoz E. , 2012)	28
Tabla 2-4 Nombre, definición y características de algunos Sistemas de Administración de puentes en el mundo (Sedano, Et al. 2011).....	32
Tabla 4-1 Factores que afectan la socavación General Fuente: adaptada al español de (Bruce W. Melville, Et al. 2000)	47
Tabla 4-2 Principales divisiones de los tiempos geológicos, rocas tipo y afloramientos principales. Fuente: (I. Cantarino, 2001).....	83
Tabla 5-1 Categorización de las vías (INVIAS)	96
Tabla 5-2 Peso según ancho del tablero (Propio)	97
Tabla 5-3 Peso según número de luces (Propio)	97
Tabla 5-4 Peso según longitud total del puente (propio)	97
Tabla 5-5 Clasificación de importancia según calificación (Propio)	97
Tabla 5-6 Peso según año de construcción (Propio)	98
Tabla 5-7 Pesos por registros históricos (Propio)	99
Tabla 5-8 Pesos por tipo de cimentación en pilas (Propio)	99
Tabla 5-9 Pesos por tipo de cimentación estribos (Propio)	99
Tabla 5-10 Tabla de vulnerabilidad ante la socavación (Propia)	99
Tabla 5-11 Pesos según erosión de los suelos (Propio)	101
Tabla 5-12 Calificación de la amenaza por agradación y degradación del cauce (Propio).....	102
Tabla 5-13 Peso según tipo de suelo en la cimentación (Propio).....	102
Tabla 5-14 Peso según tipo de material de cimentación.....	103
Tabla 5-15 Análisis de amenaza por geología de la cuenca (propio)	105
Tabla 5-16 Pesos según edad del río (Propia)	106
Tabla 5-17 Pesos según morfología del río (Propio)	106
Tabla 5-18 Pesos según pendiente del río (Propio)	106
Tabla 5-19 Pesos según la velocidad de la corriente (Propio)	106
Tabla 5-20 Tabla de amenaza generada por el río ante la socavación (Propia)	107
Tabla 5-21 Pesos por registros históricos amenaza invernal (Propio).....	107
Tabla 5-22 Pesos por registros de precipitación (Propio).....	107
Tabla 5-23 Amenaza por precipitación (Propia)	108
Tabla 5-24 Riesgo ante la socavación (Propio).....	108
Tabla 5-25 Terminología de formato de campo	113
Tabla 5-26 Riesgo complementario ante la socavación (Propio)	126
Tabla 5-27 Evaluación general del riesgo ante la socavación. Adaptado de: (Melville, Et al. 2001)	127
Tabla 6-1 Ejemplo de inspección de un puente	135
Tabla 6-2 Ejemplo de formato de campo para Inspección Visual 1	136
Tabla 6-3 Ejemplo de formato de campo para Inspección Visual 2.....	137



Tabla 6-4 Importancia del puente	147
Tabla 6-5 Recopilación de registros de cimentación en pilas y estribos de los puentes.....	151
Tabla 6-6 Calificación por vulnerabilidad de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio.....	156
Tabla 6-7 Calificación por riesgo total ante la socavación.....	168
Tabla 6-8 Tabla de importancia, intervenciones y vulnerabilidad de los puentes críticos.....	177
Tabla 6-9 Tabla resumen de riesgo total y priorización.....	177

LISTA DE FOTOS

Foto 2-1 Colapso de puente del ferrocarril Waegwan - Bridge over river Seoul-Corea del Sur Fuente: (UCA News, 2006)	21
Foto 2-2 Colapso de (Nalgonda District Bridge) near Veligonda-India Fuente: (Diario The Caravan, 2005)	22
Foto 2-3 Colapso del Puente Únete (Casanare) Fuente: (Muñoz E. , 2012)	25
Foto 2-4 Colapso de un puente en el municipio de Ariguani por ola invernal Fuente: (Diario Ariguani al día, 2013)	27
Foto 2-5 Colapso de puente en Tibasosa por ola invernal Fuente: (Alcaldía de Tibasosa, 2012).....	27
Foto 2-6 Colapso del puente sobre el río Derwent Cumbria. Fuente: (BBC News, 2009)	40
Foto 4-1 Socavación en lecho móvil y Socavación en agua clara Fuente: (Guevara, 1998)	42
Foto 5-1 degradación en el cauce Fuente: (New Zealand Transport Agency, 2009)	113
Foto 5-2 Confluencia con otras corrientes Fuente: (Guevara, 1998).....	113
Foto 5-3 Arrastre de grandes cantidades de sedimentos o escombros Fuente: (Aguas de Mérida, 2011)	114
Foto 5-4 llanuras de inundación Fuente: (Christopherson, Et al. 2010).....	114
Foto 5-5 operaciones mieras de grava o arena activas en el canal Fuente: (PEÑA, 2012)	115
Foto 5-6 ángulo significativo de ataque del flujo del canal en la(s) pilas o estribo del puente Fuente: (Guevara, 1998)	115
Foto 5-7 presencia de islas o barras que puedan afectar el flujo del canal Fuente: (Grijalva, Et al. 2012)	116
Foto 5-8 vegetación acumulada cerca de pilas Fuente: (Guevara, 1998)	116
Foto 5-9 inundaciones en las márgenes del río Fuente: (Diario de Navarra, 2010)	117
Foto 5-10 patrones de flujo sobrepasan el cauce Fuente: (Diario Pueblos America, 2010)	117
Foto 5-11 Adecuación Hidráulica (Bolsacretos) en las márgenes del canal Fuente: (Muñoz E. , 2012)	118
Foto 5-12 la planicie natural de inundación, Fuente: (Daily Mail Reporter, 2013)	118
Foto 5-13 erosión de taludes del terraplén Fuente: (Muñoz E. , 2012).....	119



Foto 5-14 topes sísmicos para evitar el desplazamiento durante las inundaciones Fuente: (ICOPZA, 2012)	119
Foto 5-15 superestructura recoge desechos o presentar una gran resistencia al flujo Fuente: (Diario El Comercio, 2012)	120
Foto 5-16 marcas de agua o cicatrices en elementos de la superestructura Fuente: (Propia, 2013)	120
Foto 5-17 Grietas o desprendimientos en la superestructura del puente Fuente: (Diario Sin Futuro, 2011)	121
Foto 5-18 sobrepaso del puente por el flujo del canal Fuente: (Diario El Nuevo Dia, 2012)	121
Foto 5-19 superestructura del puente se encuentra en zona de inundación Fuente: (Diario Pueblos America, 2010)	122
Foto 5-20 El puente presenta signos de deflexión o deformación en la superestructura Fuente: (Javier Malaga, 2007).....	122
Foto 5-21 Socavación en las pilas o estribos Fuente: (Muñoz E. , 2012)	123
Foto 5-22 Pilas del puente inclinadas Fuente: (Guevara, 1998).....	123
Foto 5-23 acumulación de residuos en aletas, pilas y/o estribos Fuente: (Noticias Álava, 2013).....	124
Foto 5-24 Obras de protección hidráulica en la subestructura del puente Fuente: (Muñoz E. , 2012)	124
Foto 5-25 movimiento transversal en los apoyos Fuente: (Guevara, 1998) ...	125
Foto 5-26 grietas en pilas o estribos Fuente: (Muñoz E. V., Et al. 2004).....	125
Foto 5-27 Asentamiento detectado en elementos lineales del puente Fuente: (Diario Prensa Libre, 2011)	126
Foto 6-1 Erosión en ladera del puente Los Gaviones	138
Foto 6-2 Foto de súper estructura puente los gaviones	139
Foto 6-3 Protección con gaviones y muros con anclajes	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Módulos del Sistema de Administración de Puentes (INVIAS, 2009)	34
Figura 2-2 Etapas de la inspección principal (INVIAS, 2009)	36
Figura 4-1 Tipos de socavación en un puente tomada de (Guevara, 1998)	44
Figura 4-2 Comportamiento del flujo en una pila cilíndrica, Fuente: tomada de (Raudkivi A. J., Et al. 1986)	49
Figura 4-3 HEC-18 (2001) Fuente: (Guevara, 1998).....	50
Figura 4-4 Socavacion en pilas Fuente: tomada de (Scientific American, 2013)	52
Figura 4-5 Angulo de ataque del flujo Fuente: (Guevara, 1998).....	53
Figura 4-6 Influencia de la profundidad del agua sobre la socavación Fuente: (Guevara, 1998)	53
Figura 4-7 Variación de la profundidad de socavación en una pila circular, sedimento uniforme y profundidad del flujo alta en relación con el ancho de la pila Fuente: (Raudkivi A. J., Et al. 1986)	54



Figura 4-8 Patrones de socavación para diferentes formas de pilas Fuente: (Maza, Et al. 1967)	55
Figura 4-9 Formas de pilas más comunes Fuente (U. S Department of Transportation, 1979)	56
Figura 4-10 Coeficiente Kd que muestra el efecto del tamaño del sedimento sobre las profundidades de socavación en las pilas Fuente: (Raudkivi A. J., Et al. 1986)	57
Figura 4-11 Influencia de la desviación estándar geométrica del sedimento y de la profundidad de socavación Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000).....	58
Figura 4-12 Configuración no uniforme de las pilas. Zona 1: tope de la fundación por encima del lecho. Zona 2: tope de la fundación dentro del hueco de socavación. Zona 3: tope de la fundación por debajo del hueco de socavación. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)	59
Figura 4-13 Influencia de desechos en la formación de huecos de socavación. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000).....	60
Figura 4-14 Formas comunes de estribos Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)	62
Figura 4-15 Influencia de la intensidad del flujo V/V_c sobre la profundidad de socavación. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)	63
Figura 4-16 Angulo de ataque del flujo sobre el de estribos. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)	63
Figura 4-17 Esquema de estribos construidos en cauces compuestos Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000).....	64
Figura 4-18 Influencia de la gradación del sedimento. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)	65
Figura 4-19 Escalas espaciales para la evaluación de la socavación. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000).....	67
Figura 4-20 Correlación entre hidrograma de crecientes y profundidades de socavación Fuente: (Guevara, 1998).....	74
Figura 4-21 Representación esquemática en área de montaña tropical Fuente: (Suárez, 2001).....	78
Figura 4-22 Formas del cauce del rio Fuente: (Muñoz E. , 2012) adaptado de (Suárez, 2001).....	80
Figura 4-23 Tipos de cauce Fuente: (Muñoz E. , 2012) adaptado de (Suárez, 2001)	81
Figura 4-24 Sitios en los cuales se produce erosión lateral por la construcción de puentes Fuente: (Suárez, 2001)	84
Figura 5-1 Flujo de la metodología para la evaluación de la Socavación en los puentes Fuente propia.....	91
Figura 6-1 Flujo grama del Aplicativo Computacional	140
Figura 6-2C Comparacion metodologia propia y SIPUCOL	176

LISTA DE GRAFICAS

Grafico 1 Análisis de importancia de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio	147
Grafico 2 Distribución según tipo de cimentación en pilas	150



Grafico 3 Distribución según tipo de cimentación en estribos	151
Grafico 4 Intervenciones de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio	154
Grafico 5 Vulnerabilidad de los puentes fase preliminar	155
Grafico 6 Amenaza por erosión en la cuenca	158
Grafico 7 Amenaza por geología de la cuenca	160
Grafico 8 Amenaza producida por la cuenca	161
Grafico 9 Amenaza por precipitación	163
Grafico 10 Análisis de Riesgo preliminar por socavación.....	164
Grafico 11 Riesgo por inspección visual	166
Grafico 12 Riesgo total por socavación.....	168
Grafico 13 Clasificación Metodología.....	172
Grafico 14 Clasificación SIPUCOL.....	172
Grafico 15 Priorización por importancia y riesgo.....	175

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 Importancia de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio	146
Mapa 2 Análisis de vulnerabilidad basados en antecedentes (cimentación de pilas).....	149
Mapa 3 Análisis de vulnerabilidad basados en antecedentes (cimentación de estribos).....	150
Mapa 4 Intervenciones de los Puentes de la Vía Bogotá Villavicencio.....	153
Mapa 5 Vulnerabilidad de los puentes fase preliminar	155
Mapa 6 Amenaza por erosión en la cuenca	158
Mapa 7 Amenaza por geología de la cuenca de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio.....	159
Mapa 8 Amenaza por tipo de cauce	161
Mapa 9 Amenaza por precipitación.....	162
Mapa 10 Análisis de Riesgo Preliminar por socavación.....	164
Mapa 11 Riesgo por inspección visual.....	166
Mapa 12 Riesgo total por socavación	167

LISTA DE ECUACIONES

(1) profundidad de socavación de equilibrio en una pila	51
(2) profundidad de socavación de equilibrio en una pila	51
(3) Factores que afectan la socavación local en estribos.....	61
(4) profundidad de socavación en estribos cortos	62
(5) profundidad de socavación en estribos largos.....	62



1 INTRODUCCION

El siguiente trabajo de grado tiene como objeto el desarrollo de una metodología para la priorización del riesgo ante la socavación que se puede presentar a la infraestructura de los puentes en Colombia, apoyados en un sistema de información geográfica (ArcGIS v10.2). La necesidad del desarrollo de esta metodología radica principalmente en el hecho que la socavación, además de ser el principal causante de colapsos en el mundo, se ha convertido en un problema cada vez más delicado que se ha visto incrementado en Colombia durante los últimos años, principalmente durante las temporadas invernales.

Para el desarrollo de la metodología se realizó una exhaustiva investigación de antecedentes y marco teórico principalmente enfocado en metodologías para la priorización y análisis de riesgo por socavación. Gracias a este estudio realizado se lograron definir las fases de las cuales estará compuesta la metodología. Para el caso particular de este trabajo de grado se propone una metodología que consta de seis (6) fases principales, de las cuales por motivos de alcance se desarrollaran únicamente las primeras cuatro (4), a continuación se presentan las fases son:

- Fase 1 Importancia y vulnerabilidad preliminar
 - Análisis de importancia basado en factores económicos
 - Análisis de vulnerabilidad basado en antecedentes
- Fase 2 Factores de erosión geología y tipo del suelo
 - Análisis de amenaza por erosión y uso del suelo
 - Análisis de amenaza por geología de la cuenca
- Fase 3 Factores climáticos y tipo de cuenca
 - Análisis de amenaza por tipo de cauce
 - Análisis de amenaza por crisis invernal y precipitación
 - Análisis de riesgo preliminar basado en fase 1, 2 y 3
- Fase 4 Labores de campo
 - Análisis de vulnerabilidad y amenaza por inspección visual de campo
 - Análisis de riesgo basado en labores por inspección visual de campo
 - Análisis de riesgo total
- Priorización

Con el fin de validar la metodología, se realizaron dos visitas de inspección visual en puentes localizados en la vía Bogotá Villavicencio, para esto se tuvo que solicitar autorización de la concesión. De estas visitas y de los diversos análisis realizados en las fases se obtuvieron calificaciones de riesgo, estas fueron comparadas con las calificaciones que se tenían de SIPUCOL.



Se obtuvieron resultados satisfactorios ya que se logró corroborar con SIPUCOL y las visitas de campo que efectivamente los puentes que obtuvieron resultados más críticos fueron aquellos que obtuvieron las calificaciones más altas de priorización. Adicionalmente, el ArcGIS demostró ser de gran utilidad a la hora de realizar una metodología en la cual se involucran los conceptos de amenaza riesgo y vulnerabilidad, esto es debido a que permite generar todo tipo de mapas siempre y cuando se cuente con la información necesaria.

Con el desarrollo de esta metodología se pretende distribuir de forma eficaz los recursos y dar un soporte frente a la toma de decisiones ayudando a priorizar las zonas más vulnerables del país ante el fenómeno de socavación.

2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

En Colombia las oleadas invernales han demostrado ser un gran problema para la infraestructura vial de la nación, en especial para la integridad de los puentes; sin embargo los factores climáticos en ocasiones superan las expectativas provocando el colapso o dañando dichas estructuras, a diferencia de otros factores tales como la inspección, mantenimiento e instrumentación de dichas estructuras, los factores climáticos no pueden ser controlados por el hombre.

Una de las razones principales de colapso o fallas de puentes en Colombia y otros países es causada por el fenómeno de socavación en las pilas y estribos de dichas estructuras, este fenómeno es generado principalmente por los cambios en el cauce, profundidad y forma de los lechos de ríos donde se encuentran cimentados, lo cual genera una situación aún más crítica en temporadas de lluvias (Muñoz E. , Et al. 2001). Según la (Scientific American, 2013) una reconocida revista de ingeniería y el servicio forestal de los Estados Unidos (Forest Services, 1998) la socavación es también la principal causa de colapsos en este país, de allí que el proceso haya sido muy estudiado. Un claro ejemplo de esto son las importantes investigaciones que encontramos a nivel internacional como las de (Melville, Et al. 2001) y (Lagasse, 2001) así como las investigaciones que se han hecho en el país como las de (Guevara, 1998) y (Muñoz E. , 2012)

No obstante encontramos que a pesar de los diversos estudios que se han realizado a nivel nacional como internacional, la socavación sigue siendo un tema delicado y difícil de evaluar ya que este involucra una gran cantidad de variables. Por esta razón se plantea la necesidad para evaluar el riesgo ante este fenómeno con el fin de priorizar los recursos.



2.1 REGISTROS HISTÓRICOS DE COLAPSOS DE PUENTES

2.1.1 Colapsos a nivel mundial

En la Tabla 2-1 se muestran algunos de los principales colapsos por socavación de puentes a nivel internacional, tomados de (Muñoz E. , 2012), en el cual se muestra el nombre, el país, año y una descripción breve de la causa o motivo de su derrumbamiento. Según estadísticas realizadas por (Muñoz E. , 2012) el 27% de los casos se produjeron por socavación relacionada con

- Inundaciones y falta de área hidráulica
- Desastres naturales
- Afectación local y global en la cimentación de pilas, estribos y aletas
- Acumulación de escombros
- Afectación de las márgenes

Tabla 2-1 Colapsos históricos de puentes a nivel internacional Fuente: (Muñoz E. , 2012)

Numero	Nombre	País	Año	Breve descripción/causas
1	Dever, Oklahoma	Estados Unidos	1906	Marea alta y presión de escombros: derrumbamiento de estructura
2	Branxholme Rail Bridge	Nueva Zelanda	1916	Socavación en pilas
3	Ashburton River	Nueva Zelanda	1931	Socavación general: afectación de pilas
4	Bridges over Weser River Bremen	Alemania	1947	Inundaciones y hielo flotante: afectación del puente
5	Bridges over Mosel River near Koblenz	Alemania	1947	Inundaciones y hielo flotante: afectación del puente
6	Mahitahi River	Nueva Zelanda	1955	Socavación y acumulación de desechos: afectación de pilas
7	Motorway Bridge near Salzburg	Austria	1959	Socavación por inundaciones
8	Interstate 29 West Bridge	Estados Unidos	1962	Desastre natural. Inundaciones y socavación
9	Puente cerca de Charleston, SC Copper River	Estados Unidos	1965	Desastre natural. Inundaciones y socavación
10	Esslingen Bridge	Alemania	1969	Inundaciones durante construcción
11	Drinsollie Bridge Inverness	Inglaterra	1973	Una luz colapso por afectación en estribo. afectación de fundación



12	Rangitikei River	Nueva Zelanda	1973	Flujo lateral del río: socavación en una de sus pilas
13	Interstate 17 Bridge Black Canyon, AZ	Estados Unidos	1978	Desastre natural. Inundaciones y socavación
14	Mt. White	Nueva Zelanda	1979	Socavación y falla de una pila local: acumulación de desechos sobre una de sus pilas produjo socavación local
15	Waitaki River	Nueva Zelanda	1980	Flujo de agua: erosión de las pilas
16	Little Man River	Nueva Zelanda	1980	Socavación general sobre pilas
17	Blackmount Road Bridge	Nueva Zelanda	1980	Socavación de una pila a una profundidad de 2m
18	Bridge over a river British Columbia	Canadá	1981	Socavación e inundaciones
19	Two-span truss bridge over Traun River between Linz and Selzthal	Austria	1982	Socavación
20	Waitangitona	Nueva Zelanda	1982	Acumulación de desechos: socavación local
21	Bullock Creek	Nueva Zelanda	1983	Inundación y socavación
22	Whakatone	Nueva Zelanda	1983	Erosión de la rivera del río y socavación de estribo del puente
23	Bridge between Jabalpur and Gandia Modhya Prodesh	India	1984	Socavación en pilas
24	Waianiwa Stream N 1	Nueva Zelanda	1984	Socavación de la rivera del río y afectación en estribos
25	Branxholme Rail Bridge	Nueva Zelanda	1984	Socavación en pilas
26	Thames	Nueva Zelanda	1985	Socavación de la rivera del río y afectación en estribos
27	Schoharie Creek Bridge near Fort Hunter, NY	Estados Unidos	1987	Inundaciones y socavación
28	Glanryhd Railway Bridge over River Towy near Llandeilo, Wales	Inglaterra	1987	Inundaciones y colapso al paso de un tren
29	Schoharie Creek	Holanda	1987	Socavación local: colapso de dos pilas



30	Arahura River	Nueva Zelanda	1988	Erosión de la rivera del rio aguas arriba
31	Waipoao	Nueva Zelanda	1988	Gran inundación que amplio el ancho del canal
32	Wairoo	Nueva Zelanda	1988	Inundación y acumulación de material: afectación de pilas dela estructura
33	Hall's Access	Nueva Zelanda	1988	Socavación local y general sobre pilas
34	Mangaheio N 2	Nueva Zelanda	1988	Socavación local y general sobre pilas
35	Mangaheio N 5	Nueva Zelanda	1988	Acumulación de material sobre pilas y tendencia del rio a afectar márgenes
36	Inverness, Scotland	Inglaterra	1989	Inundaciones fuertes
37	New River	Nueva Zelanda	1989	Socavación en pilas
38	Stony Creek	Nueva Zelanda	1989	Socavación y acumulación de desechos sobre pilas
39	Five-span box girder motorway bridge over Inn River near Kufstein	Austria	1990	Socavación y asentamiento
40	Blackmount Road Bridge	Nueva Zelanda	1991	Socavación de pila central con profundidad de 2 a 3m
41	Five-span bridge at Forteviot (May River) 10km south of Perth, Scotland	Inglaterra	1993	Inundación y socavación
42	Saylorville Dam, Iowa	Estados Unidos	1993	Inundación: socavación de cimentación del puente
43	Taiwan	China	1993	Socavación de cimentación del puente
44	Lottery River	Nueva Zelanda	1993	Socavación de márgenes y de estribo. Profundidad de socavación entre 1.5 y 2m.
45	Oreti River	Nueva Zelanda	1994	Socavación en pilas
46	Camerons Creek	Nueva Zelanda	1994	Erosión de rivera del rio y socavación de estribo del puente
47	Branxholme Rail Bridge	Nueva Zelanda	1994	Socavación general y acumulación de desechos
48	Ohutu	Nueva Zelanda	1994	Socavación local y general



49	Twin 1-5 Bridges. Coalinga, CA	Estados Unidos	1995	Socavación de fundaciones
50	Tennessee River Bridge Clifton, TN	Estados Unidos	1995	Socavación
51	Bridge in Braz, Vorarlberg	Austria	1995	Socavación y accidente de tren
52	Waitaki River N 1	Nueva Zelanda	1995	Socavación local y general
53	Walnut Street Bridge , Harrisburg, PA	Estados Unidos	1996	Daño por socavación y hielo
54	Hatchie River Bridge near Conington, TN	Estados Unidos	1999	Socavación de bases
55	Bridge over river Lisbon	Portugal	2001	Socavación y accidente de bus
56	Bridges in Germany South and East	Alemania	2002	Grandes inundaciones: afectación de puentes del este a oeste
57	Bridges in Austria. Various locations	Austria	2002	Inundaciones
58	Two bridges. Central China	China	2002	Inundaciones
59	Long Span suspension over river Daman	India	2003	Inundaciones
60	Interstate 20 bridge on Salt Draw River near Pecos, TX	Estados Unidos	2004	Inundaciones
61	Lee Roy Selmon Expressway Tampa Bay, FL	Estados Unidos	2004	Socavación
62	Rural Bridge (Beaver Dam Creek) near Shelby, NC	Estados Unidos	2004	Desastre natural.
63	Bridge over river Seoul	Corea del Sur	2004	Socavación
64	Bridge (Nalgonda District) near Veligonda	India	2005	Socavación
65	Railway Bridge	India	2005	Inundación y socavación
66	River bridge 40km west of Charters Towers Queensland	Austria	2005	Inundación
67	Feltham	Inglaterra	2009	afectación en cimentación
68	Broadmadow	Irlanda	2009	Derrumbamiento parcial por alta marea
69	Elkhorn River Bridge	Estados Unidos	2010	Socavación de bases
70	Carrabassett River Bridge	Estados Unidos	2011	Inundaciones y socavación en las bases
71	USH 310 Bridge	Estados Unidos	2012	Socavación general

Es evidente que unos de los países donde más se ha estudiado el tema son los Estados Unidos y Nueva Zelanda, ya que son en donde se encuentra la mayor cantidad de registros y estudios realizados, de la misma forma también son en los cuales sus condiciones geográficas generan fenómenos más críticos en términos de socavación y por lo tanto la inversión estatal de dinero es mucho más alta para mantener la infraestructura vial en funcionamiento

En la Foto 2-1 se observa el puente ferroviario de Waegwan en Corea del Sur, el cual colapso por fenómenos de socavación después de una fuerte época invernal, sus cimientos fueron arrasados por la corriente y genero millonarias pérdidas en transporte de alimentos e insumos en las ciudades cercanas,



Foto 2-1 Colapso de puente del ferrocarril Waegwan - Bridge over river Seoul- Corea del Sur Fuente: (UCA News, 2006)

En india el colapso del puente Nalgonda District Bridge en la Foto 2-2 género que varias poblaciones quedaran incomunicadas, particularmente en india existen repetitivos eventos de colapsos por socavación, lo cual ha generado alto flujo de capital destinado a rehabilitación y reconstrucción de puentes para mantener en funcionamiento la infraestructura vial de ese país



Foto 2-2 Colapso de (Nalgonda District Bridge) near Veligonda-India Fuente: (Diario The Caravan, 2005)

Los fenómenos de socavación, representan un importante gasto en la economía de diversos países, sus efectos abarcan millones en gastos, mantenimiento, rehabilitación y reconstrucción e incluso daños colaterales de importancia sobre las poblaciones afectadas.

2.1.2 Colapsos a nivel Nacional

En base a la información suministrada por parte del Instituto Nacional de Vías (Invías), las concesiones, (Sociedad Colombiana de Ingenieros, 1994), la (Universidad Nacional de Colombia, 1998), la (Universidad de los Andes, 2000), lo cual está documentado en la referencia y del libro de (Muñoz E. , 2012), de las 63 estructuras estudiadas entre 1986 y el 2006, el 32% colapsaron o sufrieron derrumbamiento por causa de la socavación.

Principalmente sus causas fueron la socavación local de sus estribos o pilas, lo cual es común en estructuras de antigüedad mayor a 20 años, en donde el criterio fundamental de diseño se centraba en la capacidad portante del material dejando de lado los fenómenos de socavación.

En la siguiente tabla (Muñoz E. , 2012) , se presenta la lista de algunos de los puentes colapsados en Colombia por socavación con una breve descripción de su causa a partir de la información recopilada.



Tabla 2-2 Colapsos históricos de algunos de los puentes por socavación a nivel Nacional Fuente: (Muñoz E. , 2012)

Numero	Fecha	Nombre	Breve descripción/causas
1	7/5/2011	Puente de El Zulia	El río acabó con el muro de contención de la base, dejándola desprotegida ante futuros incrementos del caudal. Dos de los tres bloques de la base se desencajaron debajo del puente.
2	3/14/2009	Lebrija	Estructura en concreto que falló por socavación produciendo la incomunicación de sabana de torres, zona de producción petrolera. Localización: departamento de Santander
3	1/10/2006	Maracas	Puente en concreto de 10m de luz afectada por socavación. Localización: carretera San Roque- La Paz
4	7/12/2006	San Jorge	Estructura en acero de una luz de 25m. La creciente socavó un estribo de la margen izquierda. Localización: carretera la Lupa-Bolivia San Santiago (Cauca)
5	3/10/2006	Tacarigua	Puente provisional Mabey de 51.58m de luz que colapso por creciente de río. Localización: carretera Cabuya-Saravena (Casanare)
6	4/9/2004	Tacaragua	Estructura en concreto que falló por socavación produciendo la muerte de militares. Localización: departamento del Cauca
7	23/06/2004	Parrilla	Puente en concreto que falló por creciente. Localización departamento de Caldas
8	17/05/2004	Banadia	Puente con una superestructura en concreto de una luz de 72.35m, cuya pila falló por socavación y dejó aislado el departamento del Cauca del departamento de Santander
9	1/9/2000	Tabasia	Puente en concreto de 14m de luz que fallo por socavación en estribo. Localización: carretera Tunja-Miraflores-Páez (Boyacá)
10	1/6/2000	Guaduas-Cabezas	Puente de concreto que falló por socavación en la pila central y estribo izquierdo. Localización: carretera San



			Alberto-La Mata (Ocaña)
11	4/4/2000	El Guajiro	Puente en concreto de 30m de luz cuyo estribo falló por socavación. Localización: La Guajira
12	2000	Únete	Puente en acero cuyo estribo falló por socavación lateral. Se rehabilito con micropilotes y goteo, pero posteriormente su estructura metálica colapso
13	1/11/1999	La Gómez	Puente en concreto de 53m de luz cuyo estribo falló por socavación. Localización: carretera Lizama-San Alberto
14	19/11/96	Jorge Gaitán Duran	Puente en concreto, cuya pila falló dos veces por socavación. Localización: Cúcuta
15	1/4/1996	Sabandija	Puente de armadura en acero cuyo estribo falló por socavación producto de una creciente de una quebrada afluente al rio. Localización: carretera Honda-Mariquita (Tolima)
16	29/11/1994	Rio Pata	Falla por socavación. Localización: Huila
17	11/11/1994	San Luis	Falla por socavación. Localización: Huila
18	1/8/1994	El secreto	Puente en acero cuyo estribo falló por socavación lateral. Localización: carretera Guateque-El secreto Boyacá
19	1/7/1994	Carare	Puente en concreto cuya pila tuvo una falla parcial por socavación. Localización: carretera rio Ermitaño-La Lizama (Santander)
20	12/6/1994	El Guajiro	Falla por socavación. Localización: La Guajira
21	27/5/1994	Guillermo León Valencia	Puente en acero cuya pila falló por socavación. Localización: carretera Villavicencio-San Juan de Arama (Meta)
22	27/5/1994	Barranca de Upia	Puente cuya pila No. 4 fallo. Localización: carretera Villavicencio-Barranca de Upia (Meta)
23	1987	Cabaria	Fallo por socavación. Localización: Boyacá
24	1987	Guamal	Puente en concreto que falló por socavación. Localización: carretera Granada-Villavicencio (Meta)

Según el inventario anterior, uno de los principales casos de estudio en términos de socavación fue el puente únete, Foto 2-3, el cual fallo dos veces, la primera vez se debido a fenómenos de socavación lateral en uno de sus estribos y terraplén de acceso, esto se solucionó mediante la construcción de micro pilotes y un sistema de protección con muros de gaviones, lo cual incluyo el gateo del puente metálico que de alguna forma afecto las armaduras de acero que fallaron posteriormente (Muñoz E. , 2012)



Foto 2-3 Colapso del Puente Únete (Casanare) Fuente: (Muñoz E. , 2012)

En términos generales, los puentes que han fallado en Colombia por fenómenos de socavación no tuvieron un estudio hidráulico en su etapa de diseño, por lo que su cimentación se elaboró sin contemplar las profundidades de socavación probables de acuerdo con las características del cauce y de la cuenca. En el país muchos puentes fueron construidos sin ningún estudio hidrológico, hidráulico y de socavación por tanto su sitio de ponteadero fue seleccionado más por el diseño geométrico de la vía que por su evaluación técnica y análisis de posibles problemas de socavación. (Muñoz E. , 2012)

2.1.3 Crisis invernal en Colombia

Aunque la intensidad de precipitación en Colombia varía mucho por región, gran parte del territorio nacional vive año tras año dos intensas temporadas de lluvia (abril-junio y octubre-noviembre) y, tras cada una de éstas, se repiten las inundaciones en las partes bajas de las cuencas de los ríos Cauca, Magdalena, Sinú y Atrato entre otros.. (OXFAM, 2011)

Según estudios realizados por el (PNUD, 2009) y el (IDEAM, 2012), los sistemas humanos más sensibles al crisis invernal incluyen principalmente recursos hídricos, agrícolas (seguridad alimentaria) y forestales; del mismo modo zonas marinas (bancos de peces) y costeras, asentamientos humanos, energía, industria, seguros y otros servicios financieros, así mismo los sistemas



relacionados con la salud humana. El nivel de vulnerabilidad dependerá principalmente de la localización geográfica, el tiempo y las condiciones sociales, económicas y ambientales de cada región

“El fenómeno de La Niña” es un fenómeno climático centrado en la zona ecuatorial que se presenta cuando las aguas del océano Pacífico se enfrían más de lo normal, provocando un cambio en los patrones de vientos y lluvias. El efecto de una pequeña variación, que este año fue de menos de dos grados, es el que se vio en las noticias: niveles de precipitación cuatro a cinco veces mayores a los normales, cientos de muertos, varios millones de damnificados e incalculables pérdidas económicas. (OXFAM, 2011)

Existen tres importantes factores que contribuyen a generar daños colaterales a la población: la vulnerabilidad de la infraestructura en Colombia, la insostenibilidad medioambiental de los patrones de desarrollo y la falta una visión integral de gestión del riesgo que podría evitar que una ola invernal se vuelva desastre. (OXFAM, 2011)

Una de las temporadas de lluvias más críticas en Colombia, comenzó a mediados de abril de 2010, se intensificó con la presencia del fenómeno de “La Niña “en el segundo semestre del año. El (IDEAM, 2012) advirtió que éste fenómeno ha sido más intenso en comparación con episodios anteriores. La costa Caribe de Colombia ha sido la más afectada por las grandes inundaciones, entre otras causas por la suma de vulnerabilidades y la carencia de mecanismos y experiencia de la gente para hacer frente a esta situación. El 7 de diciembre de 2010, el Presidente de la República declaró un estado de emergencia. La población afectada, de acuerdo con las cifras oficiales es de 3.069.307 personas, con 417 muertos, 523 heridos, y 77 desaparecidos. En su mayoría constituyen poblaciones asentadas en zonas marginales y de difícil acceso.

La ola invernal también causó la destrucción de vías, puentes y pueblos enteros, esto implica la reconstrucción de aproximadamente 200.000 viviendas y la recuperación de vías, puentes, diques y otras obras públicas. La recuperación y reconstrucción, según manifestó el Presidente de Colombia, tomará todo el período de su gobierno (Secretaria General del Senado de la República, 2011)

Según del Departamento Nacional de Planeación (DNP) en el año 2011 se calcularon pérdidas de 11 billones de pesos aproximadamente 2,1% del PIB en pérdidas en sectores como industrial, agrícola, ganadero y en daños de infraestructura (Diario Vanguardia, 2012) .En la Foto 2-4 en donde el derrumbamiento del puente que comunicaba el departamento del Cesar y el Magdalena, a través de la troncal de los contenedores ocasionó un gigantesco represamiento de vehículos de varios kilómetros .En la Foto 2-5 el colapso del

puente el Reyes de la Cruz como resultado de millonarias pérdidas en términos económicos, sociales y de infraestructura en esta región .



Foto 2-4 Colapso de un puente en el municipio de Ariguani por ola invernal Fuente: (Diario Ariguani al día, 2013)



Foto 2-5 Colapso de puente en Tibasosa por ola invernal Fuente: (Alcaldía de Tibasosa, 2012)

Según él (INVIAS, 2010), a mediados de 2011 más de 1670 kilómetros de vías y 98 puentes fueron afectados por el invierno, para esto destinaron 660 mil millones de pesos.

Es por esta razón que el tema de la socavación es de gran interés para la nación, ya que siendo uno de los principales factores de colapso de puentes se convierte en una de las primeras causas del retraso de la infraestructura vial de la nación.



2.2 ESTUDIOS REALIZADOS A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL EN EL TEMA DE SOCAVACIÓN

En Colombia y el mundo existen diversos estudios y metodologías para evaluar la socavación en puentes, sus enfoques son en algunos casos numéricos y en otros casos se desarrollan a partir de metodologías de evaluación en campo, a continuación en la Tabla 2-3 se nombran algunas de ellas junto con una descripción general y su respectiva referencia.

Tabla 2-3 Metodologías de priorización de la socavación basado en (Muñoz E. , 2012)

	Referencia	Descripción General
Estados Unidos	(Kattell, Et al. 1998) Bridge Scour Evaluation; Screening, Analysis & Countermeasures	El proyecto se basó en una metodología por fases, que pretendía mejorar la obtención de resultados de susceptibilidad y riesgo a partir de un método de priorización, basado en algoritmos matemáticos para la evaluación de la socavación.
	(Chen, Et al. 2000) Evaluation of scour and stream stability by using CAESAR	Desarrollada en Estados Unidos , demostró ser una metodología muy completa y adecuada para la priorización, ubicación y atención de puentes afectados por fenómenos de socavación basándose en un algoritmo desarrollado en VISUAL BASIC, el cual le asigna pesos a diversos ítems a partir de inspecciones de diferentes características tanto morfológicas, de composición del lecho e hidrológicas entre otras.
	(Kelly, 1999) Underwater Inspection Criteria	Se desarrolló como una metodología para evaluar las estructuras marítimas, como por ejemplo muelles o embarcaderos que pueden llegar a ser afectados por fenómenos de socavación, se enfoca en evaluar y asegurar la integridad de dichas estructuras.
	(Lagasse, 2001), Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures - Experience, Selection, and Design Guidelines	Investigación que buscaba identificar la magnitud de la socavación en los puentes y métodos para mitigar y controlar dichos efectos, también buscaba desarrollar métodos novedosos para analizar la socavación en los puentes
	(Palmer, Et al. 1997) CAESAR: Catalog and Expert Evaluation on Scour Risk and River Stability at bridge Site	Es un aplicativo computacional que se basa en el ingreso de datos acerca de las condiciones de un puente, como lo son sus características geométricas, la forma de las pilas, el número de pilas y los factores dinámicos como lo son la pendiente del cauce, la turbiedad del agua y a partir de estos factores se determina la susceptibilidad o riesgo de presentarse socavación en cada caso.



	(Lagasse, 2001) Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures - Experience, Selection, and Design Guidelines	Este documento, identifica y proporciona pautas de diseño para la socavación de los puentes en base a la experiencia y estrategias innovadoras que se traen de otros países, las estrategias de gestión y orientación, para el desarrollo de un plan de acción para recorrer puentes críticos en esta materia se describen y se ofrecen orientación en materia de instrumentación mediante equipos electrónicos
	(Richardson E. A., Et al. 2000) Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC 18), Fourth Edition, FHWA NHI 01-001, Federal highway Administration, Washington D.C	Se presenta el estado del conocimiento y la práctica para el diseño, evaluación e inspección de puentes por socavación, esta versión posee métodos de computación para analizar geometrías más complejas e información acerca de aplicativos computacionales utilizados para dichos fines
	(Richardson E. A., Et al. 2000) Evaluation scour at bridges (HEC 18) FHWA	Este documento es la quinta edición de HEC-18. Se presenta el estado del conocimiento y la práctica del diseño, evaluación e inspección de puentes en términos de socavación, posee un componente de sugerencias de diseño para los nuevos puentes y un manual de inspección para los puentes existentes que puedan poseer problemas de socavación
	(Works Consultancy Services, 1990) “Wairoa bridge failure: Assessment of total costs”, Report for Transit New Zealand, Wellington, New Zealand)	Este trabajo implica técnicas de gestión de riesgos combinados con análisis de escenarios en diversos temas incluyendo la socavación, pero una dificultad con este enfoque es decidir qué hipótesis deben ser incluidas para el análisis. Esta dificultad puede ser superada a través de un "enfoque recorrido escenario", que consiste en la generación aleatoria de acontecimientos peligrosos durante un periodo de análisis adecuado, para proporcionar una base para la priorización de la gestión de riesgos de socavación
Canadá	(University Of Toronto Press, 2004) Roads and transportation association of Canada (RTAC) 'guide to bridge hydraulics'	Manual de diseño hidráulico para puentes en Canadá el cual abarca temas de tipologías de ríos, tipos de materiales del lecho y se enfoca en la construcción de estructuras que eviten los fenómenos de socavación, tiene un fuerte componente probabilístico para la priorización de puentes afectados por la socavación e involucra la hidrología de la zona como recolección de información prioritaria



Australia	(Austroads, 1994) Waterway Design – A Guide to the Hydraulic Design of Bridges, Culverts and Floodways.	Manual de diseño hidráulico para puentes en Australia, con un importante componente numérico basado en la teoría de diseño de canales abiertos y factores de rugosidad, posee información acerca de factores de manning para diseñar adecuadamente puentes que estén resguardados para fenómenos de socavación
Nueva Zelanda	(Bruce W. Melville, Et al. 2000) “Bridge-Scour Screening Methodology for New Zealand Bridges” ,	Este reporte tiene como objetivo desarrollar una validación del estado de los puentes a través de una metodología de inspección visual, la cual tiene como objetivo principal la priorización del problema de socavación basado en una metodología de calificación de los puentes obtenida en base a una serie de registro y a una serie de puntajes dadas por la selección de distintos parámetros los cuales darán un puntaje final y serán de gran ayuda a la hora de toma de decisiones
	(Building Industry Authority, 1992) New Zealand Building Code Handbook,	Documento que posee amplia información en los métodos para la estimación de descarga hidráulica de diseño, también posee predicción de la socavación a partir de complejos modelos probabilísticos junto con métodos de contingencia para controlar la socavación y métodos de protección de taludes en estribos de puentes
Suecia	(Dargahi, Et al. 1982) Local scour at bridge piers - A review of theory	Este Reporte tiene como objetivo realizar una aproximación más practica a los métodos de evaluación de socavación, posee un fuerte componente numérico y cálculos matemáticos basados en la teoría de flujo libre y turbulencia alrededor de pilas cilíndricas
Japón	(Fukui, Et al. 2000) Development of the new Inspection Method on Scour Condition around Existing Bridge Foundations	Esta metodología desarrollada en Japón la cual se basa en instrumentación de los puentes a partir de un bote controlado a distancia el cual posee equipos de sonar los cuales pueden representar en tiempo real y con una alta exactitud el lecho del río a manera de poder establecer la situación actual y posible comportamiento del fenómeno de socavación, posee un aplicativo informático que analiza a partir de telemetría los datos hidráulicos del medio en el que esta y los relaciona con la forma y conformación del lecho del río para arrojar conclusiones acerca del futuro comportamiento del lecho del río y la posible susceptibilidad de socavación.



Inglaterra	(Faraday, Et al. 1983) Hydraulic Factors in Bridge Design	Documento de diseño hidráulico para puentes en Inglaterra, con amplia teoría y métodos de diseño que eviten el efecto de socavación en estructuras nuevas y mecanismos de contingencia en puentes existentes, su tema principal se basa en el diseño y los factores que generan socavación en los puentes.
Rusia	(Phillips, Et al. 2005) Scour and Arctic Marine Pipeline Workshop	Documento que investiga el proceso de socavación generado cuando bloques de hielo se desplazan entre las pilas y estribos del puente , generando una modificación en el lecho del canal, la velocidad, capacidad de erosión y la susceptibilidad a la socavación
Colombia	(Guevara, 1998) Socavación en puentes (Acosta, 1987) Socavación Local en Pilas de Puente y Diseño de Estructuras Protectoras (Flechas, 1985) Estudio de la influencia del material granular sobre la socavación en pilares de puentes	Estudios enfocados al análisis de tipos de socavación puntuales, prevención y control de la misma a partir de formulaciones matemáticas y conocimientos hidráulicos del comportamiento de las laderas y la influencia del material del lecho del canal en la susceptibilidad de la socavación

Uno de los casos más representativos fue desarrollado en Estados Unidos llevada a cabo por (Chen, Et al. 2000). Esta metodología demostró ser muy completa y adecuada para la priorización, ubicación y atención de puentes afectados por fenómenos de socavación basándose en un algoritmo desarrollado en VISUAL BASIC, el cual le asigna pesos a diversos ítems a partir de inspecciones de diferentes características tanto morfológicas, de composición del lecho e hidrológicas. Por otro lado se encuentran metodologías con un componente de mayor desarrollo tecnológico como es el caso de (Fukui, Et al. 2000) Japón la cual se basa en un bote controlado a distancia que posee equipos de sonar los cuales pueden representar en tiempo real y con alta exactitud el comportamiento del lecho del río, además de esto permite realizar predicciones a futuro del comportamiento de la socavación en el puente. También podemos encontrar autores que han estudiado a profundidad el fenómeno de socavación como (Bruce W. Melville, Et al. 2000) los cuales han realizado grandes aportes en el tema de socavación ver Tabla 2-3.

2.3 SISTEMAS DE ADMINISTRACION DE PUENTES EN EL MUNDO

Los sistemas de administración de puentes en el mundo surgieron como una necesidad de unificar y organizar la información importante de los puentes, como una forma de lograr mejor organización y eficiencia en los procesos que involucraban las intervenciones y los registros de los puentes en cada país, como los relacionados con las inspecciones visuales y en algunos casos el análisis de la socavación. (Muñoz E. , 2012)

Los sistemas de administración de puentes, han sido alimentados con información valiosa acerca de las características y propiedades como son geometría, tipología, estado, datos de tráfico, capacidad de carga,



instrumentación, año de construcción, presupuestos, priorización, entre otras de los puentes en diferentes países, dicha información se vuelve importante a la hora de revisar registros históricos o antecedentes que permitan orientar la inspección visual orientada a la socavación, de una manera más clara.

A continuación se presenta la Tabla 2-4 con los principales sistemas de administración de puentes en el mundo junto con sus características principales y su aporte en el tema de socavación.

Tabla 2-4 Nombre, definición y características de algunos Sistemas de Administración de puentes en el mundo obtenida de (Sedano, Et al. 2011)

NOMBRE – PAÍS	DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICA
PONTIS® BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM (Estados Unidos)	<p>Es un sistema de administración de puentes que asiste a las agencias de transporte en la toma de decisiones sobre el mantenimiento, rehabilitación y reemplazo de estructuras. PONTIS® almacena el inventario completo y datos de inspecciones visuales, incluyendo detalles de las condiciones de los elementos; formula políticas de mejoramiento puntuales para puentes pertenecientes a redes económicas. Hace también recomendaciones en cuanto a la optimización del beneficio en escenarios de pocos fondos para reparación. Adicionalmente, PONTIS reporta periódicamente los niveles proyectados y pronosticados del ciclo de vida y su velocidad de deterioro. Contiene módulos de plantación de proyectos de preservación, programación e inspección subjetiva. Posee un mecanismo de intercambio y actualización de datos con sistemas de verificación en campo del puente. Sistema bajo la supervisión de la AASHTO que es compatible con las bases de datos estatales. los nuevos modelos Podrán evaluar y priorizar las condiciones actuales y futuras, los riesgos debido a la socavación o sísmica y la seguridad objetivamente a través de todos los puentes.</p>
ADVITAM® BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM (FRANCIA)	<p>Dirigido directamente a empresas y que ha desarrollado un sistema que cuenta con la experiencia combinada de los principios de la administración de estructuras, computación aplicada y experiencia en construcción. Es capaz de adaptarse a cualquier tipo de método de evaluación particular para la recopilación de datos e información. El sistema se puede montar fácilmente para que trabaje en sistemas de redes de información particulares. Tiene manejo de datos, manejo de inventario, documentos e información de los puentes y restringe su acceso mediante claves de seguridad. Hace la evaluación de la estructura y localiza y puntualiza posibles futuras intervenciones. Desarrolla análisis de costos basado en análisis del ciclo de vida, administrando tanto recursos como tiempos en cronogramas. Datos de entrada por monitoreo de deterioro. Permite la entrada de datos de modelos de elementos finitos. Calcula la vida del puente con modelos de deterioro y con la matriz de acciones sobre el puente. Localiza el puente con las coordenadas obtenidas de sistemas de</p>



	posicionamiento geográfico GIS, posee amplia compatibilidad con equipos de monitorización de socavación en tiempo real.
SIPUMEX® SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE PUENTES (MEXICO)	<p>El Sistema de Puentes de México (SIPUMEX) es un sistema que permite contar con un inventario de la totalidad de los puentes de la Red Federal de Carreteras, en el que se incluyen las características, ubicación y estado físico. Ello permite efectuar una priorización de las necesidades de mantenimiento y rehabilitación, con lo que se logra una optimización de los recursos aplicables, atendiendo al mismo tiempo a la seguridad de los usuarios. La primera fase de SIPUMEX, que se firmó en el año de 1992, está constituida por las siguientes actividades: Inventario, Inspecciones principales, Inspecciones rutinarias, mantenimiento menor y limpieza y evaluación de la capacidad de carga.</p> <p>La primera etapa de SIPUMEX, si fue cumplida, dando como resultado un inventario de los puentes de la Red federal de Carreteras, que sumaron 6,150 en total, con datos básicos como: Entidad federativa donde se ubica la estructura, la carretera, el kilometraje, tramo, año de construcción, tipo de superestructura y subestructura, el Transito Diario Promedio Anual (TDPA), etc. También, resultados de esta primera etapa, fueron, una relación de puentes que requieren reparación urgente según SIPUMEX, con un total de 280 puentes en toda la República Mexicana. Este sistema de información también cuenta con un listado preliminar de los puentes susceptibles a socavación, que hasta 2009 han sufrido este problema, para tal utilizando la herramienta informática disponible en la DGCC e IMT.</p>

Cabe resaltar que para la creación de una metodología de inspección es de gran importancia tener en consideración los conceptos de amenaza y vulnerabilidad para evaluar el riesgo. Adicionalmente uno de los factores más importantes a la hora de analizar un análisis de riesgo es definir la gravedad o la importancia del riesgo. Usualmente se divide en 5 categorías de análisis (García, 2011), y así se definió en este trabajo. Se colocaron 5 categorías de riesgo:

- Muy alto (5)
- Alto (4)
- Medio (3)
- Bajo (2)
- Muy bajo (1)

Esta categorización se adaptó de (Melville, Et al. 2001), en donde se presenta una metodología desarrollada en Nueva Zelanda para la inspección por socavación en los puentes. Cabe aclarar que al igual que esa metodología se tuvo en cuenta la importancia del puente y no solo el riesgo ante el cual se encuentra sometida la estructura.

2.4 SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE PUENTES EN COLOMBIA (SIPUCOL)

Para estudiar el problema de socavación de los puentes a nivel nacional, se empleó información del Sistema de Administración de Puentes de Colombia (Base de datos - SIPUCOL, 2009), implementado desde 1996 por el Instituto Nacional De Vías con la asesoría del Directorado de Carreteras de Dinamarca. Este sistema tiene los siguientes alcances:

- Predicción de las necesidades de mantenimiento y de los fondos requeridos.
- Elaboración de listados de puentes por prioridades de rehabilitación.
- Identificación de puentes con restricciones o limitaciones de servicio.
- Búsqueda de la mejor alternativa de rehabilitación desde el punto de vista técnico y de costo-beneficio.
- Cuantificación de los costos de inversión por puente.
- Determinación de la capacidad de carga de los puentes y sus restricciones.

El sistema identifica los puentes en estado crítico y prioriza de acuerdo con los resultados de la inspección principal, inspección especial, inspección rutinaria, el tránsito promedio diario y la capacidad de carga. Dependiente del daño o vulnerabilidad detectada, se ejecutan obras de emergencia para evitar colapsos, posteriormente se realizan estudios especializados y por último el diseño de obras de reparación definitivas. Consta de diferentes módulos, como se observa en la Figura 2-1

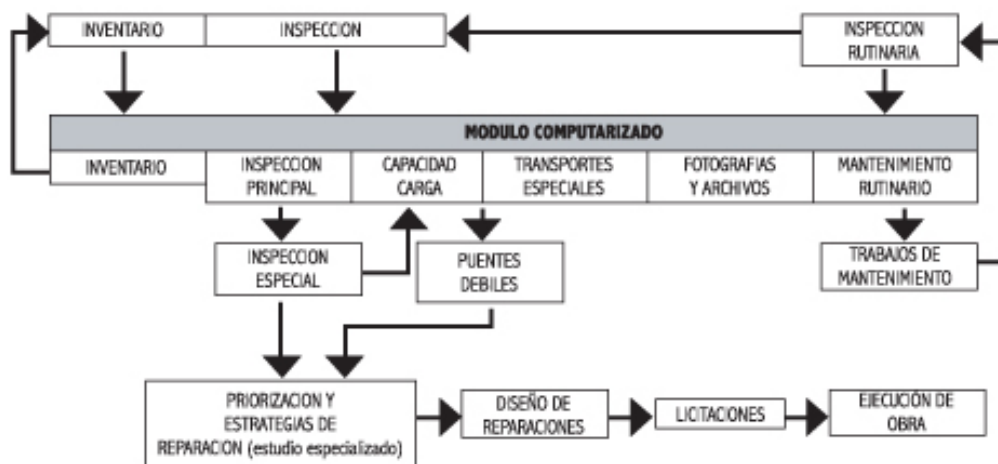


Figura 2-1 Módulos del Sistema de Administración de Puentes (INVIAS, 2009)

A continuación se hace una breve descripción de los módulos principales que conforman este sistema Ver (INVIAS, 2009)



2.4.1 Inventario

Contiene información seleccionada sobre localización, administración, geometría, tipologías de la infraestructura y superestructura, capacidad de carga, etc., para cada uno de los 2100 puentes que integran la Red Nacional de Carreteras (INVIAS, 1996) .Para el caso de la evaluación de la socavación el inventario incluye los datos de la cimentación tanto de estribos y pilas. (INVIAS, 2009)

2.4.2 Inspección Principal

Tiene por objeto realizar para cada puente, una inspección visual de cada uno de los componentes principales (superficie, barandas, bordillos, andenes, vigas, losas, pilas, estribos, apoyos, armaduras, cauces y otros) que hacen parte de la estructura y dar una calificación basada en una escala cualitativa previamente definida (INVIAS, 1996). En la Figura 2-2 se presenta las etapas necesarias para una inspección principal, que incluye: definición de los componentes, escala de calificación y los tipos de daños. Mediante este módulo se identifican los puentes que requieren de inspecciones especiales, estudios especializados y reparaciones. El estado general se basa en la calificación del componente “puente”, el cual se obtienen de la mayor calificación de los componentes clasificados como estructurales. (INVIAS, 2009)

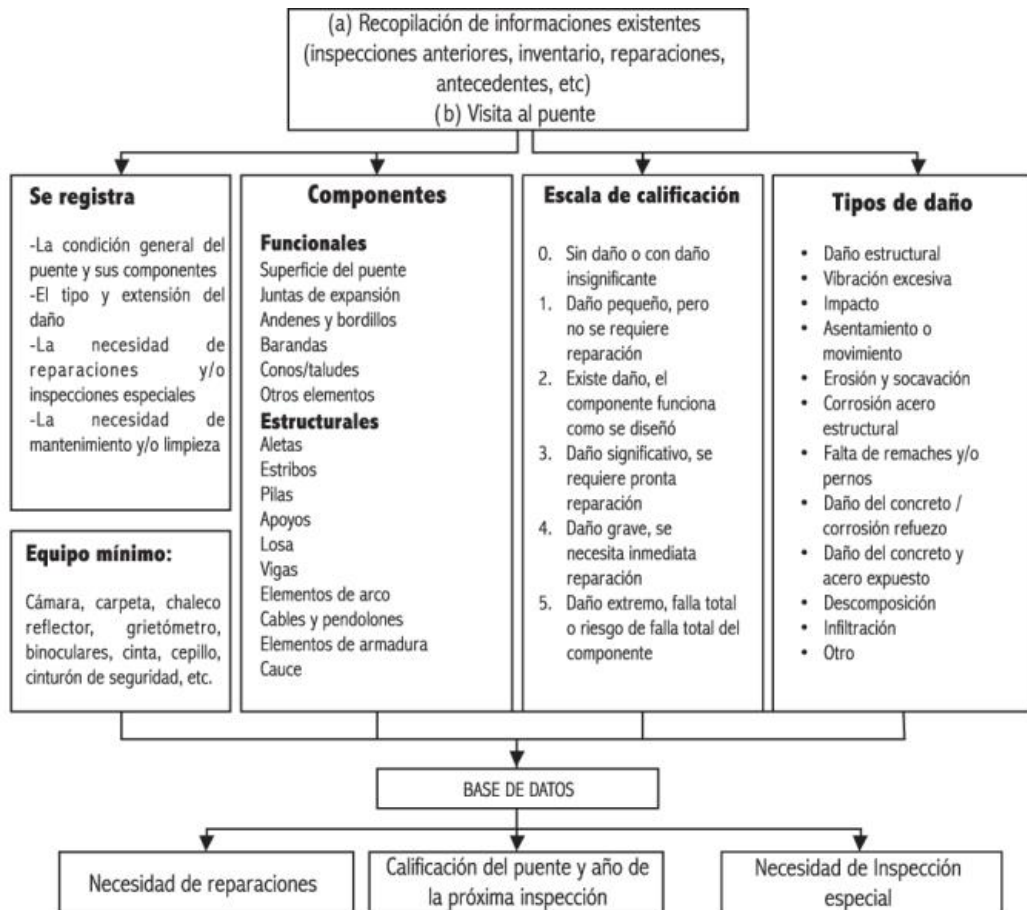


Figura 2-2 Etapas de la inspección principal (INVIAS, 2009)

Uno de los componentes que tiene este sistema es “Cauce”, como se observa en la figura anterior, el cual se le debe asignar una calificación cualitativa basada en los resultados de la inspección visual. En esta parte, es cuando el ingeniero encargado de la inspección visual califica los problemas o inconvenientes detectados por socavación en cada puente.

Es decir, que el sistema no tiene una metodología detallada para la inspección visual por socavación, si no que se emplea una general, basados en una escala de calificaciones cualitativas Figura 2-2, que son las mismas como se examinan todos los componentes del puente (tanto funcionales como estructurales), para tipos de daños diferentes a la socavación, como son: daño estructural, impacto, fatiga, corrosión, etc.

2.4.3 Inspección especial

Son auscultaciones profundas de la estructura que incluyen ensayos destructivos y no destructivos especializados en campo y en laboratorio (INVIAS, 2009). Inviás cuenta con un laboratorio móvil con equipo especializado para la realización de diagnosis del concreto y acero. Cuando hay problemas de socavación se recomiendan estudios hidrológicos e hidráulicos.



2.4.4 Capacidad de carga

Este módulo pretende identificar los puentes débiles y servir de herramienta en la administración de permisos para cargas especiales (INVIAS, 1996).

2.4.5 Inspección rutinaria, mantenimiento rutinario y limpieza de puentes

La inspección rutinaria incluye una frecuente revisión superficial de la estructura con el propósito de garantizar la seguridad del tránsito a diario y registrar las necesidades de mantenimiento rutinario y limpieza en los puentes (INVIAS, 1996). Mediante los administradores viales permite establecer políticas de mantenimiento menor y limpieza.

2.4.6 Diseño de reparación y refuerzo

Cubre la evaluación de daños, estrategias de reparación y diseño de reparación. Suministra recomendaciones sobre la toma de decisiones para las reparaciones y rehabilitaciones de los puentes, basados en las inspecciones principales, especiales y capacidad de carga. (INVIAS, 1996).

2.4.7 Priorización de obras de reparación y refuerzo

Explica detalladamente el procedimiento de la priorización y como se aplica a la administración de los puentes. Este módulo permite la asignación óptima de recursos para las obras de reparación. (INVIAS, 1996).

2.5 LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN COLOMBIA

Los sistemas de Información Geográfica para la Planeación y el Ordenamiento Territorial Nacional –SIGOT-, constituye una organización de entidades, acuerdos y recursos tecnológicos que facilita el acceso y uso de información georeferenciada, con el propósito de contribuir a una eficiente y oportuna toma de decisiones por parte de las autoridades e instancias en el sistema de planeación, a nivel nacional, regional y local, en apoyo de una mejor gestión del desarrollo territorial. (Sistema De Informacion Geografica Para La Planeacion Y El Ordenamiento Territorial , 2005)

El SIGOT inició su desarrollo en el año 2005, como un proyecto estratégico en la aplicación de los principios, objetivos y estrategias postuladas por la Infraestructura Colombiana de Datos Espaciales –ICDE- y persigue establecer, de manera coordinada y concertada con los diversos organismos y entidades líderes tanto en la producción de datos e información geográfica (productores), como responsables en los procesos de planeación (usuarios)-, un sistema que organice la producción, flujo y divulgación de información espacial, que apoye de manera oportuna y eficaz los procesos de planeación en los diferentes niveles del Estado. (Sistema De Informacion Geografica Para La Planeacion Y El Ordenamiento Territorial , 2005)

Bajo este marco, El SIGOT aporta información para la gestión del desarrollo en los diferentes niveles territoriales, contribuye al conocimiento geográfico del país y propende por la construcción de buenas prácticas en planeación y



ordenamiento territorial, con la participación de los diferentes sectores y niveles territoriales, así como por la difusión del conocimiento en materia de modelamiento y análisis del territorio con fines de planificación. (Sistema De Informacion Geografica Para La Planeacion Y El Ordenamiento Territorial , 2005)

En el 2007 el proyecto inició un ejercicio piloto a nivel regional, el cual continuó en Mayo de 2008, con el fin de complementar el aplicativo nacional con la visión de los departamentos, con miras a que este instrumento facilitara la preparación de los planes de desarrollo a nivel territorial, en municipios y departamentos (Sistema De Informacion Geografica Para La Planeacion Y El Ordenamiento Territorial , 2005)

La finalidad de este ejercicio regional es avanzar en la construcción de lineamientos de desarrollo territorial regional con los actores en este contexto, a partir de la articulación de los instrumentos de planificación estratégica (ejercicios de visión) de cada departamento y de las apuestas departamentales en el marco de la agenda de competitividad. Este proceso a su vez, permite precisar los requerimientos de información que debe satisfacer el SIGOT para ser un instrumento útil también en los procesos de ordenamiento territorial a nivel departamental y municipal, (Sistema De Informacion Geografica Para La Planeacion Y El Ordenamiento Territorial , 2005)

A partir de este trabajo de grado se pretende contribuir con dichas tecnologías emergentes, para aportar hacia un sistema nacional de información georeferenciada que permita canalizar los recursos en el término de infraestructura vial y específicamente en los puentes

Finalmente, es por este motivo que surge la necesidad de plantear una metodología para la inspección y priorización de la socavación con el fin de distribuir los recursos disponibles a las zonas donde se pueda presentar un mayor impacto por el colapso de un puente a nivel general, que es lo que pretende realizar este trabajo.



2.6 CRISIS INVERNAL

Según la (Organización De Las Naciones Unidas, 2008) este fenómeno se entiende como: “*Un cambio del clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables*”. Para el (GIECC, 2007) el fenómeno se define como: “El cambio interno del sistema climático o de la interacción entre sus componentes, o a cambios forzados externos debido a causas naturales o a actividades humanas. En general no es posible determinar claramente en qué medida influye cada una de esas causas”

El (GIECC, 2007) establecen que las zonas más vulnerables a los efectos negativos del cambio climático son las zonas con menor desarrollo en el mundo, entre estas, Latinoamérica. Lo que actualmente vemos es una aceleración peligrosa de este fenómeno, debido a la utilización excesiva de combustibles fósiles que producen más contaminación de la que los ecosistemas climáticos terrestres pueden soportar.

El Cambio Climático es un cambio significativo y duradero de los patrones locales o globales del clima, las causas pueden ser naturales, como por ejemplo, variaciones en la energía que se recibe del Sol, erupciones volcánicas, circulación oceánica, procesos biológicos y otros, o puede ser causada por influencia antrópica (por las actividades humanas), como por ejemplo, a través de la emisión de CO₂ y otros gases que atrapan calor, o alteración del uso de grandes extensiones de suelos que causan, finalmente, un calentamiento global. (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

2.6.1 Impacto del Calentamiento Global

El fenómeno del calentamiento global ha sido tema de gran interés últimamente a nivel mundial. Esto se debe principalmente al gran impacto que ha tenido sobre el ecosistema global y la economía un claro ejemplo es que en la última década las pérdidas relacionadas con el clima han aumentado de 37.000 millones de euros anuales en la década de los 80 hasta 148.000 millones de euros (Diario El País, 2013)

En la actualidad el colapso de puentes debido a la socavación se ve incrementado por la crisis invernal, un claro ejemplo de esto es el colapso de puentes debido a la crisis invernal que se vivió en Colombia durante el 2011 época en la cual varios puentes colapsaron debido a las fuertes crecientes que se presentaron. En otros países también se ha visto como el cambio climático ha provocado el colapso de puentes debido a la socavación provocada por las crecientes.

Durante el 2009 en Cumbria Inglaterra colapsaron 6 puentes debido a fuertes inundaciones y otros varios debieron ser rehabilitados (BBC News, 2009) Además es claro que como se muestra en la Tabla 2-1 de colapsos históricos a nivel internacional uno de los principales causantes de colapsos de puentes son las inundaciones que en la mayoría de los casos están asociadas con eventos extraordinarios producto de la alteración del clima mundial.



Foto 2-6 Colapso del puente sobre el río Derwent Cumbria. Fuente: (BBC News, 2009)

Estas crisis nos indican que los patrones del clima seguirán cambiando con un ciclo del agua más intenso que provocara sequías e inundaciones más pronunciadas. Las zonas secas se harán más secas y las húmedas más húmedas. Los eventos extremos del clima serán más comunes y más intensos. Esto afectará la disponibilidad de agua potable en muchas zonas del mundo. Los efectos de este cambio ya se están viendo en la actualidad.

Por estas razones en Inglaterra una empresa privada HR Wallingford ha comenzado a estudiar un nuevo enfoque para el análisis de la socavación en donde se plantea tener en cuenta el cambio climático como una variable y de esta forma poder tomar mejores decisiones a la hora de evaluar el riesgo de socavación en puentes (Wallingford, 2013)



3 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una propuesta metodológica para la evaluación de la susceptibilidad de la socavación de los puentes de la Red Vial Nacional y su correspondiente priorización para la intervención o seguimiento apoyada en un sistema de información geográfica (SIG)

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Realizar una investigación sobre el estado del conocimiento relacionado con metodologías de evaluación de la socavación de puentes a nivel nacional e internacional.
- Desarrollar un aplicativo computacional que permita priorizar y mitigar los efectos de la socavación en los puentes de Colombia, basado en un sistema de información geográfico (SIG) implementado en el programa ArcSIG.
- Validar parcialmente la propuesta metodológica concebida en este trabajo, mediante la inspección visual de los puentes existentes localizados en la carretera Bogotá Villavicencio ya que no se realizara ningún tipo de instrumentación.

4 MARCO TEORICO

4.1 SOCAVACIÓN

4.1.1 Definición

La Socavación es el fenómeno que consiste en la pérdida del material del lecho y las bancas del canal debido a la acción erosiva del agua alrededor de los puentes o estructuras cimentadas en los lechos de los ríos. Este fenómeno es producto del desequilibrio provocado entre la remoción y el aporte de material en esa sección. Adicionalmente la socavación en un puente surge por la compleja interacción entre el flujo del río, los materiales de los bordes del río y para el caso de socavación localizada el tipo de estructura del puente en sí misma.

La socavación en los lechos de los ríos es un problema complejo que puede ser evaluado de distintas maneras. La ingeniería hidráulica de los puentes debe ser considerada no solamente bajo el puente, se debe tener en cuenta el área suficiente aguas arriba como aguas abajo para tener en consideración no solo los efectos locales sino también los efectos a gran escala.

4.1.2 Formas de Socavación

Según un estudio realizado en la Universidad del Cauca, existen principalmente dos formas de socavación, las cuales dependen principalmente del transporte de sedimentos proveniente desde aguas arriba al sitio donde se encuentra el puente: socavación en lecho móvil y socavación en agua clara, lo cual se explica a continuación.



Foto 4-1 Socavación en lecho móvil y Socavación en agua clara
Fuente: (Guevara, 1998)



4.1.2.1 Socavación en lecho Móvil

La socavación en lecho móvil es un fenómeno que se presenta cuando hay arrastre de material aguas arriba hacia la zona donde se encuentra localizado el puente, se alcanza un equilibrio solo cuando la cantidad de material transportado iguala la cantidad de material que es removido.

4.1.2.2 Socavación en agua clara

Esta forma de socavación se presenta cuando no hay transporte de sedimentos desde aguas arriba al sitio del puente y no hay reabastecimiento del material socavado. En este caso se alcanza el equilibrio cuando el esfuerzo cortante producido por la corriente es menor al requerido para mover las partículas.

Situaciones donde se da socavación en agua clara:

- Cauce formado por materiales muy gruesos
- Los depósitos locales están formados por partículas más grandes que las que arrastra el cauce.
- En cauces acorazados donde la fuerza tractiva es suficientemente alta para penetrar el lecho en la zona de pilas y estribos.
- Canales con vegetación donde el flujo solo puede penetrar la cubierta en la zona de las pilas y estribos.
- Corrientes de baja pendiente y flujos bajos.

4.1.3 Tipos de Socavación

Según diversos autores, entre ellos (Bruce W. Melville, Et al. 2000) y la investigación realizada por (Guevara, 1998) la socavación se puede dividir en cuatro tipos distintos, esta división está sujeta principalmente a dos factores, la escala temporal en la que se llevan a cabo estos procesos y la magnitud de la escala de análisis física la cual hace alusión al grado de detalle en el análisis:

1. Socavación a largo plazo o degradación
2. Migración lateral de la corriente
3. Socavación general en la sección transversal del cauce por contracción del puente u otras causas
4. Socavación local en pilas y estribos de puentes

Sin embargo a pesar de las investigaciones y estudios que existen del tema, aun los cálculos de las profundidades de socavación son imprecisos. Por esta razón las profundidades son más un estimado que un cálculo propiamente dicho. Algunos de estos tipos de socavación se presentan en la siguiente figura.

Tipos de socavación

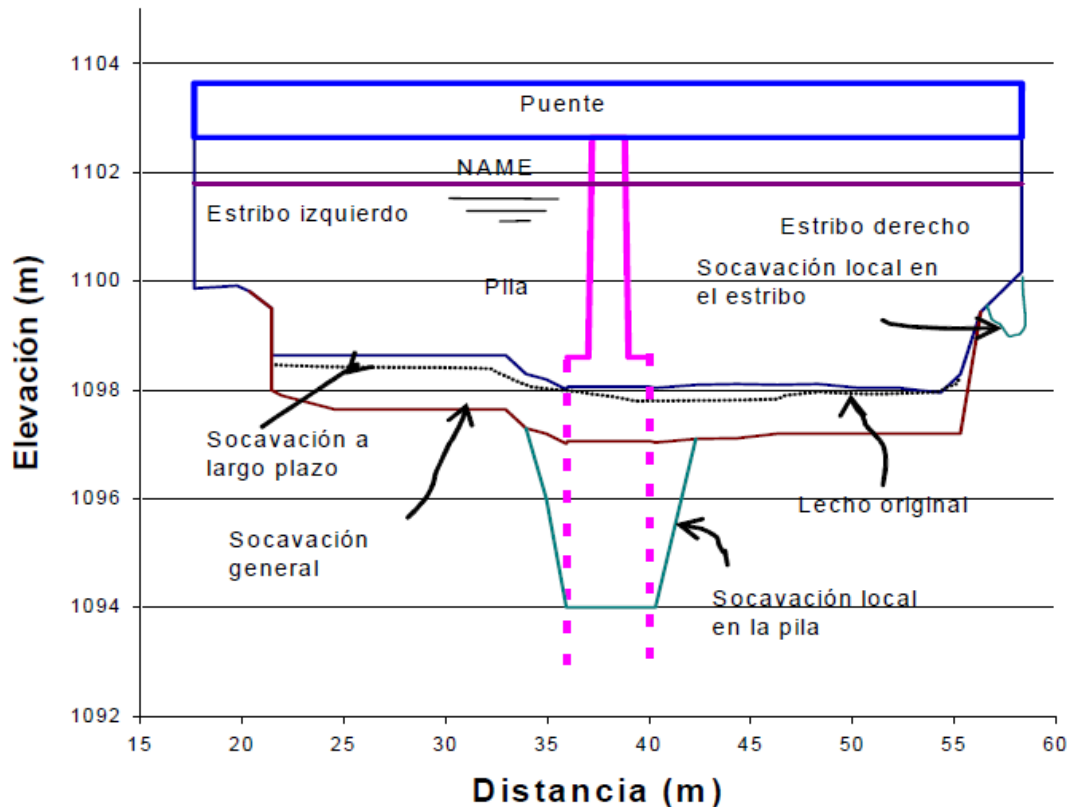


Figura 4-1 Tipos de socavación en un puente tomada de (Guevara, 1998)

En realidad para calcular la socavación total en un puente se deben tener en cuenta todos estos factores ya que todos estos procesos erosivos se llevan al mismo tiempo en el cauce. Sin embargo para al momento de evaluar la socavación en un puente se asume que cada uno de estos procesos se lleva a cabo independientemente uno del otro y finalmente se suman sus efectos.

4.1.3.1 Socavación a largo plazo o degradación

La socavación a largo plazo del cauce se refiere principalmente al efecto acumulado de varias crecientes a lo largo del tiempo, claro está que además de los factores naturales también hay incidencia de la intervención humana en los cauces. Por su naturaleza este tipo de socavación es considerado permanente e implica un descenso del fondo a lo largo del cauce debido principalmente a un déficit de aporte de sedimentos proveniente de aguas arriba lo que contribuye con la socavación total.



Durante este proceso el nivel del lecho del río se ve afectado considerablemente por razones naturales o artificiales que afectan directamente el régimen de transporte de sedimentos en el río.

No obstante la socavación a largo plazo puede estar caracterizada por dos fenómenos, la agradación o la degradación del cauce. La degradación se refiere al descenso del nivel del cauce producto de la socavación y a la falta de aporte de material particulado en el lecho. Por otro lado el fenómeno de agradación se refiere a la sedimentación del cauce producto del transporte de materiales particulados provenientes de aguas arriba del puente, la agradación es considerada benéfica en la socavación y no afecta la socavación total.

El cálculo de la socavación a largo plazo depende principalmente de determinar la tendencia del cauce durante la vida útil del puente. Una forma para hacer esto es analizar los signos existentes en el cauce y analizar los datos históricos de este fenómeno en el río, sin embargo no siempre se cuenta con esto. En el caso que se desconozca se deben aplicar conocimientos de hidráulica y analizar las condiciones de escorrentía en la cuenca.

Si se detecta que va a haber socavación a largo plazo, la profundidad estimada de socavación debe ser la inicial a la hora de calcular los demás procesos, en dado caso que se determine que habrá agradación, esta no se tendrá en cuenta y el nivel de socavación se calculara a partir del fondo original del río.

4.1.3.2 Migración lateral de la corriente

Este fenómeno se presenta principalmente en curvas unidas por tramos rectos los cuales dan origen a los meandros y se caracterizan por el arrastre de sólidos. El problema principal radica en que en los ríos meandricos hay movimiento lateral y longitudinal del cauce mientras que los puentes son estructuras estáticas, por esta razón puede presentarse una obstrucción repentina del cauce en un sitio donde no la había. Por esta razón se debe evitar la construcción de puentes en las zonas de alta movilidad de los cauces (Guevara, 1998).

Los factores que afectan la migración lateral del cauce y la estabilidad de un puente son:

- Geomorfología de la corriente
- Localización del puente
- Características del flujo
- Características del material del lecho y las bancas.



4.1.3.3 Socavación general

La socavación general consiste en el descenso del fondo del nivel del río producido por el arrastre de gran cantidad de material particulado principalmente producido por las crecientes. Su principal causa son las contracciones del cauce y se puede registrar a lo largo de todo el recorrido del río.

Sin embargo no necesariamente es producto de la construcción de un puente u otra estructura que atraviese el río, también puede ser producto de contracciones naturales en el cauce.

Según el estudio realizado por (Guevara, 1998), la mayor diferencia existente entre la socavación general y la socavación a largo plazo, es que la socavación general es considerada como un proceso transitorio y cíclico que se mayormente incrementado durante fenómenos puntuales como las crecientes.



Tabla 4-1 Factores que afectan la socavación General Fuente: adaptada al español de (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

Factores que afectan la SOCAVACION GENERAL							
GEOMORFOLOGIA/HIDROLOGIA		Factores que afectan la SOCAVACION LOCALIZADA					
		TRANSPORTE POR INUNDACION	SEDIMENTOS	GEOMETRIA DEL RIO			
Características de la Cuenca	Pecipitacion	Frecuencia de inundacion	Dimension Promedio d50	Apertura del Puente	Grado de contraccion		
	Características físicas -topografia/pendiente -Tamanno -Forma	Hidrografia	Tasa de flujo	No uniformidad	Pilas del puente	Tipo	
			Duracion	Cohesion		Posicion en el canal principal	
	Vegetacion	Velocidad del flujo	Promedio	Estratificacion vertical		Forma	Tamanno , Longitud , Ancho
			Distribucion lateral	Distribucion de la cuenca		Alineacion (angulo de ataque)	
	Suelo:	Profundidad del flujo	Corrientes secundarias	Lecho de roca: -Erosion		Estribos del puente	Tipo
-Erodabilidad	Profundidad del canal principal		-Profundidad	Posicion en el canal principal			
-Tipo	Distribucion lateral	Tasa de transporte de sedimentos		Forma	Tamanno , Longitud		
Características del rio	Características del valle Canal de flujo: -Variacion del ancho -Extension de las planicies de inundacion -Altura del canal de flujo -Forma de la seccion -Pendiente del canal -Angulo de incision	Transporte de sedimentos	Forma del lecho	Medidas de proteccion contra la socavacion			Revestimientos laterales, canalizacion, reductores de energia, diques, modificaciones al puente, enrocados etc.
		Forma de los sedimentos					
		Carga de residuos					
	Controles hidraulicos			Posicion del puente con respecto a los meandros del canal			
	Forma de la planicie: -Recta -Sinuosa/Meandrica -Trenzado/Ramificacion -Desarrollo de las orillas						
	Limites del canal: -Material de la orilla -Estabilidad de la orilla (Taludes) -Cobertura vegetal						



4.1.3.4 Socavación general por contracción

Este tipo de socavación es producido principalmente por la disminución del ancho del canal ya sea por razones antrópicas o naturales. En gran parte de los casos, este fenómeno es producto de la contracción del canal por la construcción de los terraplenes de acceso del puente y en menor medida por las pilas que interfieren el flujo.

La contracción en la sección del río provoca un incremento en la velocidad del flujo lo que produce un aumento en la capacidad erosiva y de arrastre de partículas del río, esto produce un descenso en el nivel del lecho provocando nuevamente un incremento en la sección lo que lleva a que la velocidad del flujo disminuya y se alcance nuevamente el equilibrio, donde la cantidad de material removido es igual a la cantidad de material depositado.

Algunos factores que pueden causar socavación general son:

- Contracciones naturales de la corriente
- Terraplenes de acceso al puente que obstruyen planicies de inundación
- Islas o sedimentos que puedan obstruir el cauce tanto aguas arriba como aguas abajo.
- Acumulación de desechos, basuras o hielo
- Crecimiento de vegetación en las bancas o planicies de inundación del puente
- Flujo a presión en el puente.

4.1.3.4.1 Socavación general por otras causas

La socavación general es producida principalmente por la contracción del cauce, sin embargo existen otros factores relacionados con la corriente del río, controles variables del flujo aguas abajo, flujo en codos confluencias y cambios que causan degradación del cauce.

4.1.3.4.2 Socavación local

Según (Guevara, 1998) la socavación local es el proceso de remoción del material alrededor de las pilas, estribos, diques y terraplenes de acceso de un puente. Este es causado principalmente por el cambio de dirección de las líneas de flujo, vórtices generados por la obstrucción del flujo, turbulencia y la aceleración del flujo. En este caso la profundidad máxima de socavación ocurre cuando el flujo es incapaz de remover más sedimentos del lecho en ese punto (Bruce W. Melville, Et al. 2000).

4.1.4 Socavación local en pilas

Según (Dargahi, Et al. 1982) se puede afirmar que la socavación local en pilas está ligado directamente a la separación tri-dimensional del flujo en la cara aguas arriba de la pila y a un vórtice al pie de ella. La acumulación de agua hacia aguas arriba de la obstrucción produce una onda en superficie y un flujo vertical hacia abajo lo que ocasiona un elevado gradiente de presión provocando la separación del flujo, esto genera la creación de unos vórtices alrededor de la pila los cuales son conocidos como vórtices de herradura y son los principales responsables de la socavación (Guevara, 1998).

A su vez la separación en el flujo producida por la pila genera unos vórtices más débiles conocidos como vórtices de estela (Guevara, 1998), que por medio de la interacción con el vórtice de herradura producen que el flujo oscile vertical y lateralmente.

En la mayoría de los casos el efecto de los vórtices de estela es insignificante, sin embargo este fenómeno se debe tener en consideración principalmente cuando el puente está construido sobre un cauce aluvial de arena fina con condiciones de agua clara sobre todo cuando se construye inmediatamente aguas debajo de otro.

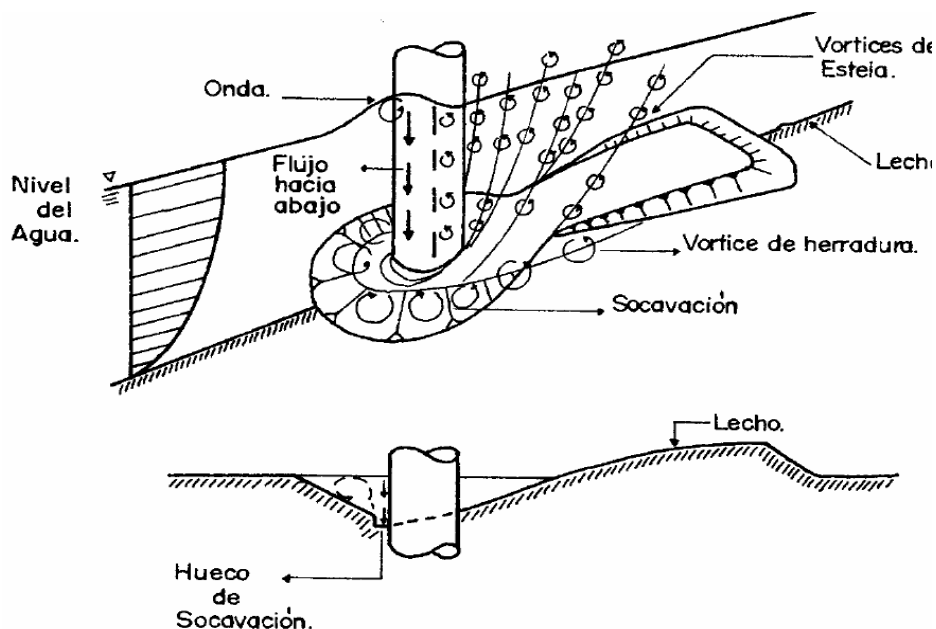
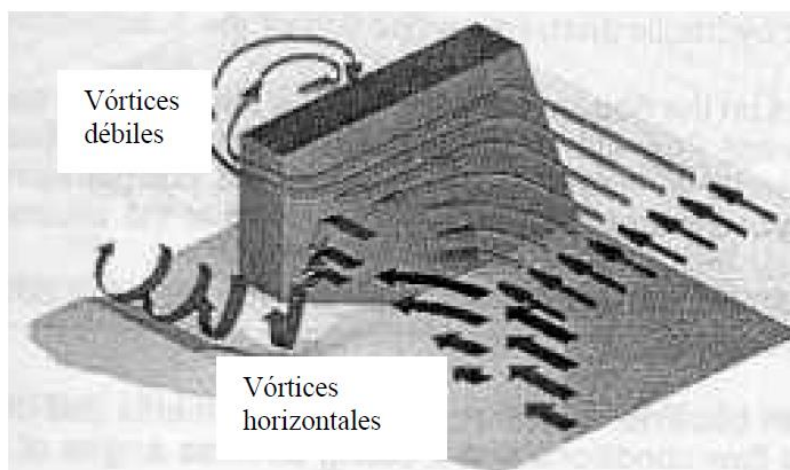


Figura 4-2 Comportamiento del flujo en una pila cilíndrica, Fuente: tomada de (Raudkivi A. J., Et al. 1986)

4.1.5 Socavación local en estribos

La socavación local en estribos se ha estudiado menos que en pilas ya que se presume que es menos relevante y afecta en menor medida a la socavación. Esto se debe al hecho que la socavación solo afecta a los estribos que interfieren directamente el flujo del agua y esto sucede principalmente cuando los terraplenes de acceso se encuentran dentro de la planicie de inundación.

La obstrucción forma un vórtice de eje horizontal que empieza en la parte aguas arriba y corre a lo largo del pie de la estructura y un vórtice de eje vertical al final de la misma (Guevara, 1998).



Mecanismo que produce la socavación local en estribos

Figura 4-3 HEC-18 (2001) Fuente: (Guevara, 1998)

4.1.5.1 Socavación Total

La socavación total en un puente es la suma de los distintos factores debido a los cuatro tipos distintos de socavación:

- Degradación a largo plazo
- Migración lateral de la corriente
- Socavación general por contracción y otras causas
- Socavación local en pilas y estribos

Hay diversos métodos para calcular las profundidades de socavación general en pilas y estribos, las cuales en su mayoría son producto de investigaciones científicas, realizadas bajo condiciones controladas en laboratorios. Por lo general no existen métodos sencillos para determinar el efecto del puente en la socavación a largo plazo y de la migración lateral de la corriente, por lo que se debe dar importancia a los registros históricos y al conocimiento y buen criterio que posea el investigador al momento de inspeccionar los puentes en campo (Guevara, 1998)



4.1.6 Factores que afectan la socavación en las pilas

La profundidad de socavación de equilibrio en una pila puede definirse a partir de la adaptación de (Bruce W. Melville, Et al. 2000) de la siguiente forma

$$ds = f(\rho_w, \rho_s, u, V, h, D, \sigma_g, g, a, F, \varphi) \quad (1)$$

ds = profundidad de socavación en la pila

f = función de

ρ_w = densidad del agua (se asume constante para casos prácticos)

ρ_s = densidad del sedimento (se asume constante para casos prácticos)

u = viscosidad cinemática (se asume constante para casos prácticos)

V = velocidad media de la corriente

h = profundidad del flujo

D = diámetro característico del sedimento

σ_g = desviación estándar geométrica del sedimento

g = aceleración debida a la fuerza de gravedad

a = ancho de la pila

F = parámetro que describe la forma de la pila

φ = ángulo de ataque del flujo que indirectamente considera la longitud de la pila

La viscosidad cinemática, las densidades del agua y del sedimento se asumen constantes para casos prácticos y por lo tanto la ecuación 1 se puede presentar en forma dimensional de la siguiente manera ecuación 2:

$$\frac{ds}{a} = f\left(\frac{V^2}{gD}, \frac{h}{a}, \frac{D}{a}, \sigma_g, F, \varphi\right) \quad (2)$$

Junto con los anteriores factores también se involucran otros que afectan la profundidad de socavación como lo son:

- Duración del proceso erosivo
- Tipos de sedimentos :granular o cohesivo
- Estratificación del fondo del canal
- Configuración y morfología del cauce
- Presencia de desechos
- Tamaño y posición de la cimentación

Comúnmente los factores asociados a los cálculos de socavación en pilas solo se basan en las dimensiones y forma de la pila, el ángulo de ataque del flujo, la profundidad y la velocidad del flujo

4.1.6.1 Ancho de la pila

La forma y geometría de la pila, es un factor que genera una perturbación en el flujo regular del agua, entre más aumenta el ancho de la pila, la profundidad de socavación aumenta ya que con esto aumenta el tamaño de los vórtices de herradura asociados con el proceso erosivo, sin embargo algunas investigaciones nos sugieren que cuando el ancho de la pila aumenta demasiado, la capacidad erosiva del flujo disminuye considerablemente debido a que los vórtices pasan de catalogarse de herradura a vórtices de estela.

Algunos expertos, han propuesto que la profundidad de socavación puede ser menor o igual a 2 veces en ancho de la pila, este valor puede aumentar a 2.3 en sedimentos sin formaciones de lecho como rizos, algunos investigadores han propuesto soluciones simples como la profundidad de socavación en pilas circulares varía entre 1.4 a 2.4 veces el ancho de la pila (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

4.1.6.2 Longitud de la pila

En el escenario en el cual las pilas se encuentran alineadas respecto a la dirección del flujo, los vórtices no se forman de la manera que ocurriría si las pilas estuvieran sesgadas respecto al flujo, por ello este posicionamiento debe tenerse en cuenta al momento de realizar los cálculos de socavación, siendo la orientación sesgada de las pilas la menos favorable en términos de socavación.

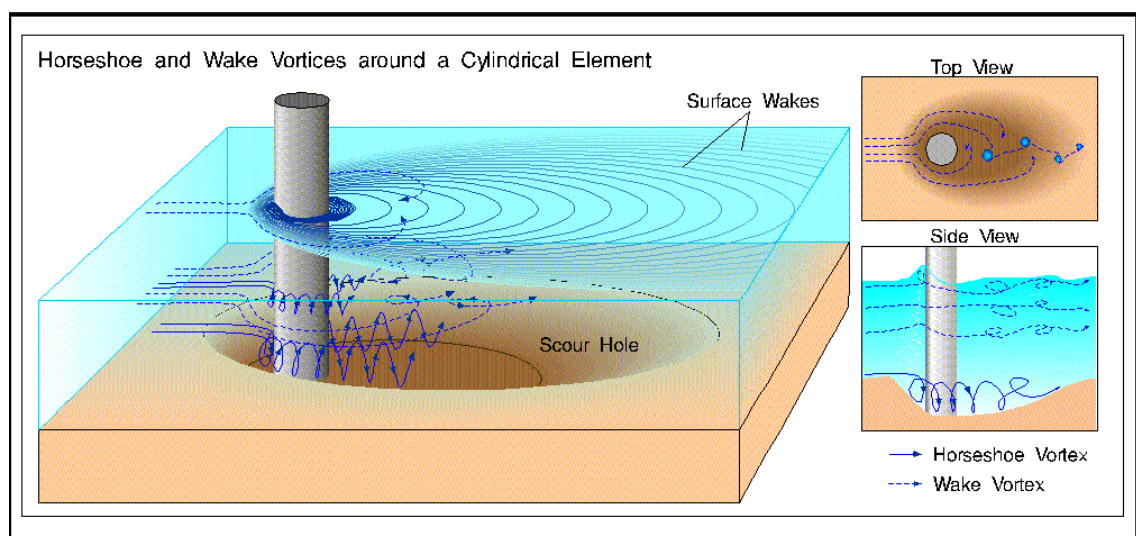


Figura 4-4 Socavacion en pilas Fuente: tomada de (Scientific American, 2013)

4.1.6.3 Angulo de ataque del flujo

El ángulo de ataque es de mayor influencia para la socavación local, en el escenario en el cual las pilas no están alineadas con la corriente, a medida que aumenta este ángulo, la ubicación y la profundidad máxima de socavación se direccionan a lo largo del lado expuesto de la pila desde aguas arriba a aguas abajo

Para pilas no alineadas con la dirección de la corriente, la profundidad local de la socavación está relacionada con el ancho proyectado de la pila y este aumenta rápidamente con el ángulo de ataque del flujo y la longitud de la pila

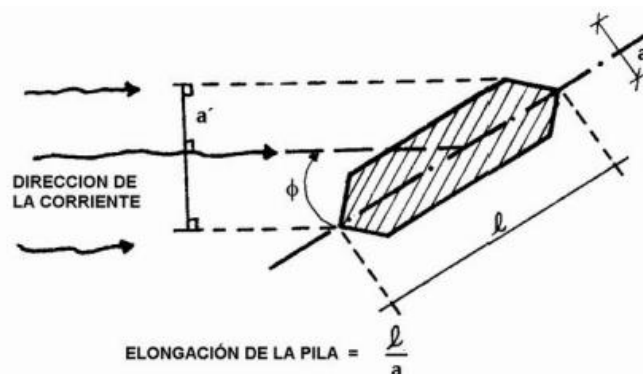


Figura 4-5 Angulo de ataque del flujo Fuente: (Guevara, 1998)

4.1.6.4 Profundidad del agua

Se relaciona directamente con la profundidad de socavación, puesto que un aumento en la profundidad del nivel del agua, supone un aumento en el caudal y que a su vez aumenta la profundidad de socavación, se ha determinado que la profundidad de socavación aumenta hasta un valor límite de la relación de la profundidad del flujo (h)/ ancho de la pila (a) donde no hay influencia de la profundidad del flujo, se considera este valor límite cuando h/a es mayor que 3.

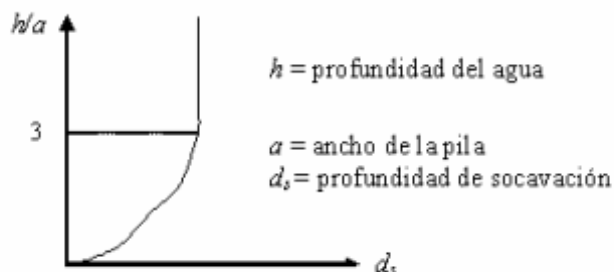


Figura 4-6 Influencia de la profundidad del agua sobre la socavación Fuente: (Guevara, 1998)

4.1.6.5 Velocidad del Flujo

A mayor velocidad del flujo, mayor es la capacidad de arrastre y por tanto de la socavación, se aumentan las condiciones críticas para el transporte de sedimentos en términos de la frontera del fenómeno de agua clara y lecho móvil, la socavación local comienza en una pila cuando la velocidad del flujo excede aproximadamente la mitad de la velocidad crítica para el inicio de movimiento de las partículas, la siguiente figura ilustra el comportamiento de la profundidad de socavación con la velocidad ($v > 0.5 v_c$)

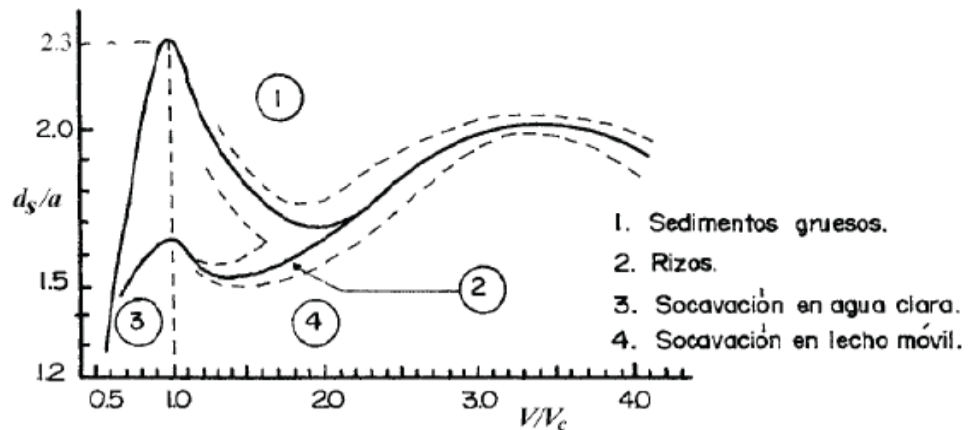


Figura 4-7 Variación de la profundidad de socavación en una pila circular, sedimento uniforme y profundidad del flujo alta en relación con el ancho de la pila Fuente: (Raudkivi A. J., Et al. 1986)

4.1.6.6 Forma de la pila

Las pilas de un puente tienen diversas formas y cada una de ellas genera un efecto diferente en los patrones de flujo y la socavación, por ejemplo las pilas rectangulares ocasionan mayor socavación que una pila circular o de nariz aguda, el efecto de la forma de la pila se hace insignificante para ángulos de ataque mayores de 5 grados, según (Davis, Et al. 2001) o 10 a 15 grados según (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

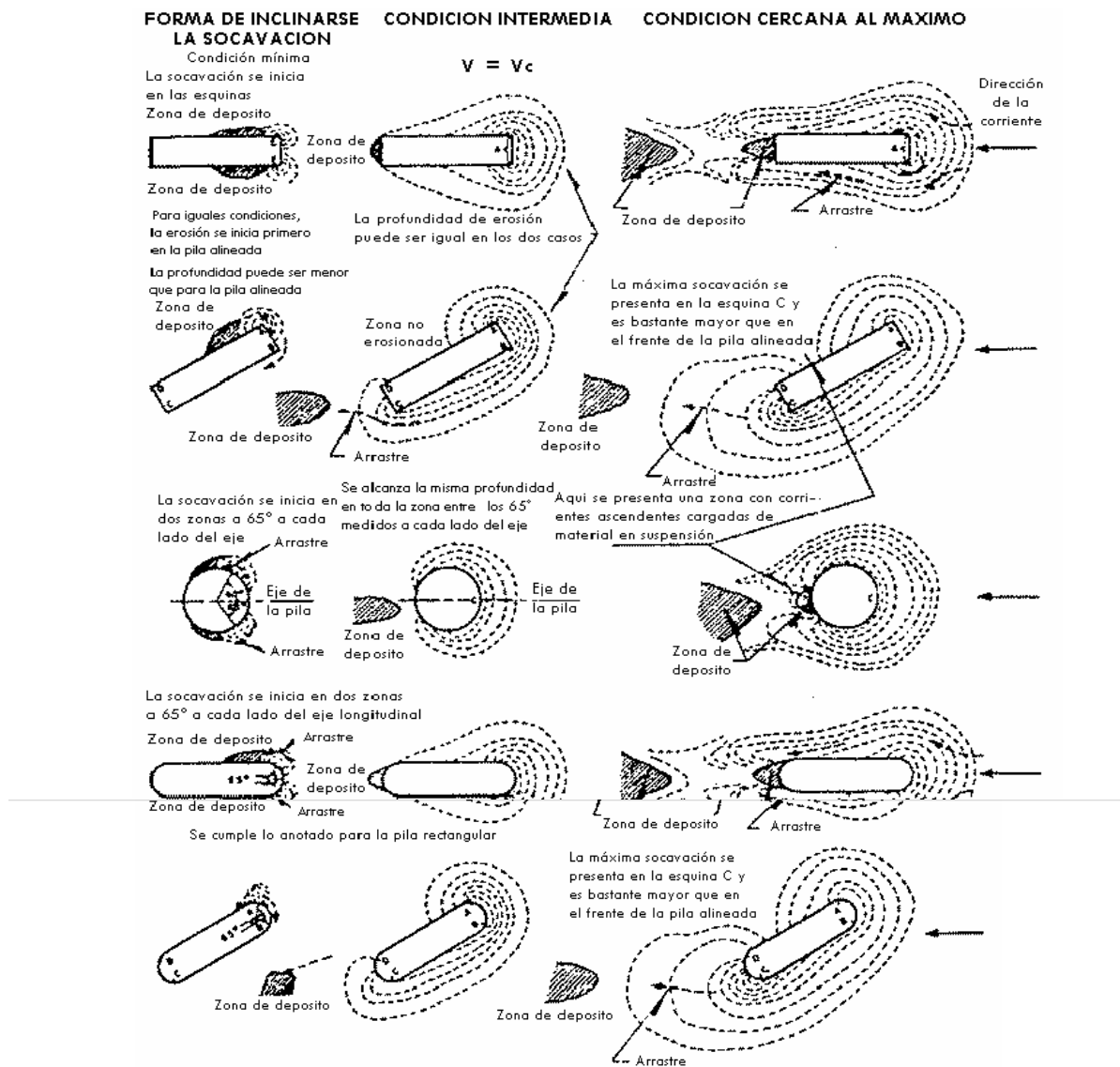


Figura 4-8 Patrones de socavación para diferentes formas de pilas Fuente: (Maza, Et al. 1967)



En la figura se ilustran diferentes etapas de socavación para diferentes geometrías de las pilas, se observa que la máxima socavación en pilas circulares ocurre a lo largo de una diagonal a 45 grados con relación al eje de simetría del flujo aguas arriba

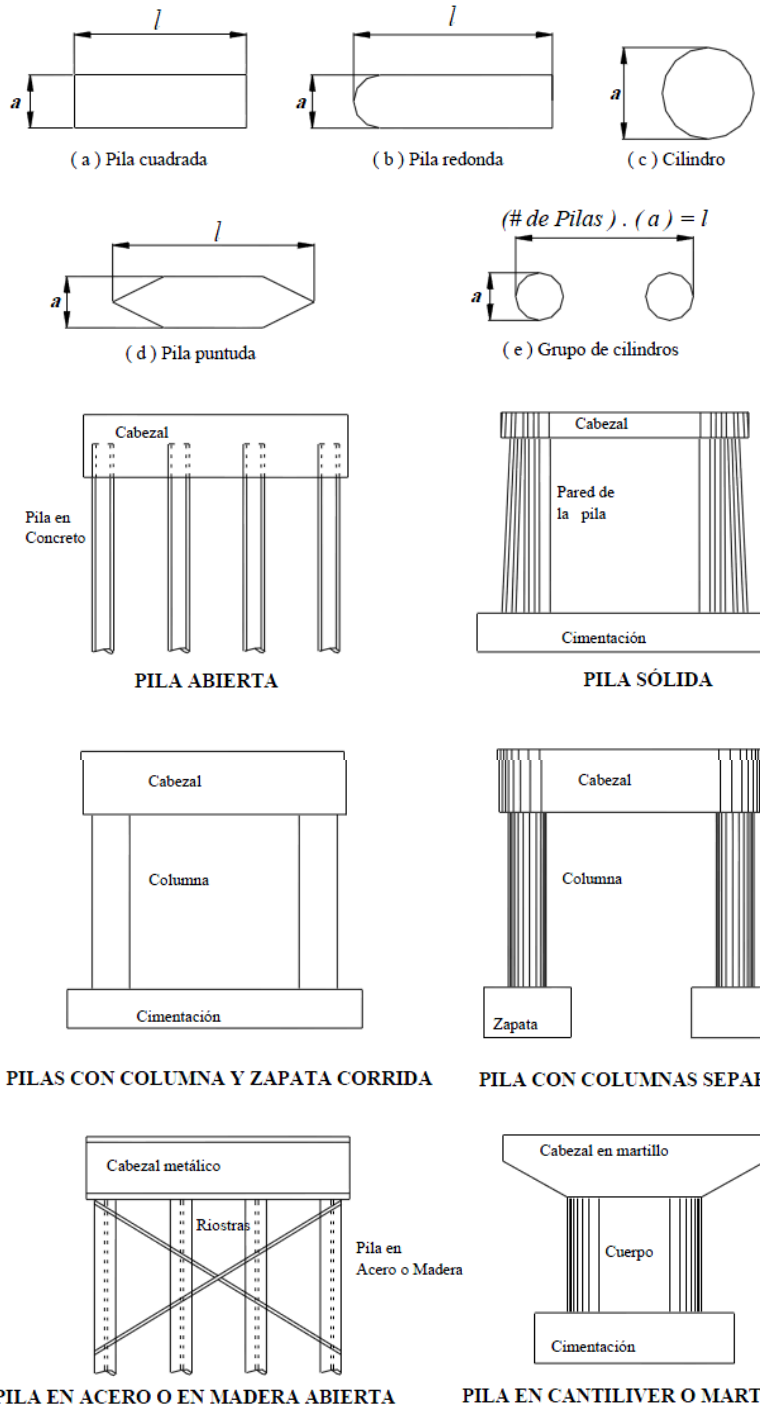


Figura 4-9 Formas de pilas más comunes Fuente (U. S Department of Transportation, 1979)

4.1.6.7 Características del material del lecho como tamaño y cohesión

Los sedimentos que poseen gran tamaño en relación con las dimensiones de la pila tienden a limitar la socavación, (Guevara, 1998), mas sin embargo investigaciones realizadas (Raudkivi A. J., Et al. 1986) determinaron que en condiciones de socavación de agua clara la profundidad de socavación no depende del tamaño si $a/D_{50} > 20-25$,

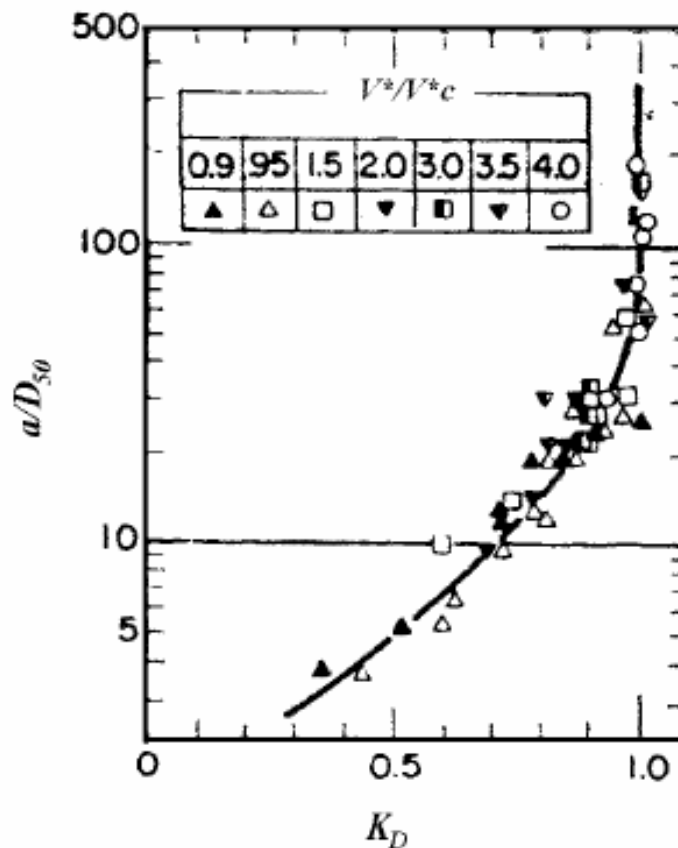


Figura 4-10 Coeficiente K_D que muestra el efecto del tamaño del sedimento sobre las profundidades de socavación en las pilas Fuente: (Raudkivi A. J., Et al. 1986)

La Figura 4-10 muestra como el tamaño del sedimento no influye en los resultados de socavación si $a/D_{50} > 50$ (Raudkivi A. J., Et al. 1986) lo cual también es comprobado por (Bruce W. Melville, Et al. 2000), considerando que el tamaño de los sedimentos es mucho menor que el tamaño de la pila, su influencia no se toma generalmente para el cálculo de la socavación local, así como el tamaño de las partículas más grandes que no son removidas por el vórtice o turbulencia, tampoco afecta en gran medida la socavación, pero si el tiempo en que ello ocurre, el material grueso en el fondo del canal puede generar que alrededor de la pila disminuya la profundidad de socavación como se resalta en (Guevara, 1998)

4.1.6.8 Gradación del sedimento

Según (Guevara, 1998) las mezclas de sedimentos no informes, disminuyen la profundidad de socavación, investigaciones en el campo han demostrado que este efecto es bastante grande bajo condiciones de agua clara, pero se reduce cuando el lecho es móvil debido a fenómenos de acorazamiento que impiden la socavación para flujos bajos, sin embargo una vez rota la coraza ante flujos altos, se estimula el movimiento de sedimentos como gravas y arenas.

Según (Bruce W. Melville, Et al. 2000) reporto que para velocidades altas $V > v_c$, las profundidades de socavación prácticamente no dependen del tamaño de partículas, en la Figura 4-11 se muestra la influencia del tamaño del sedimento sobre la profundidad de socavación, la reducción de la socavación se debe a la presencia de un lecho acorazado formado al ser transportadas las partículas más finas

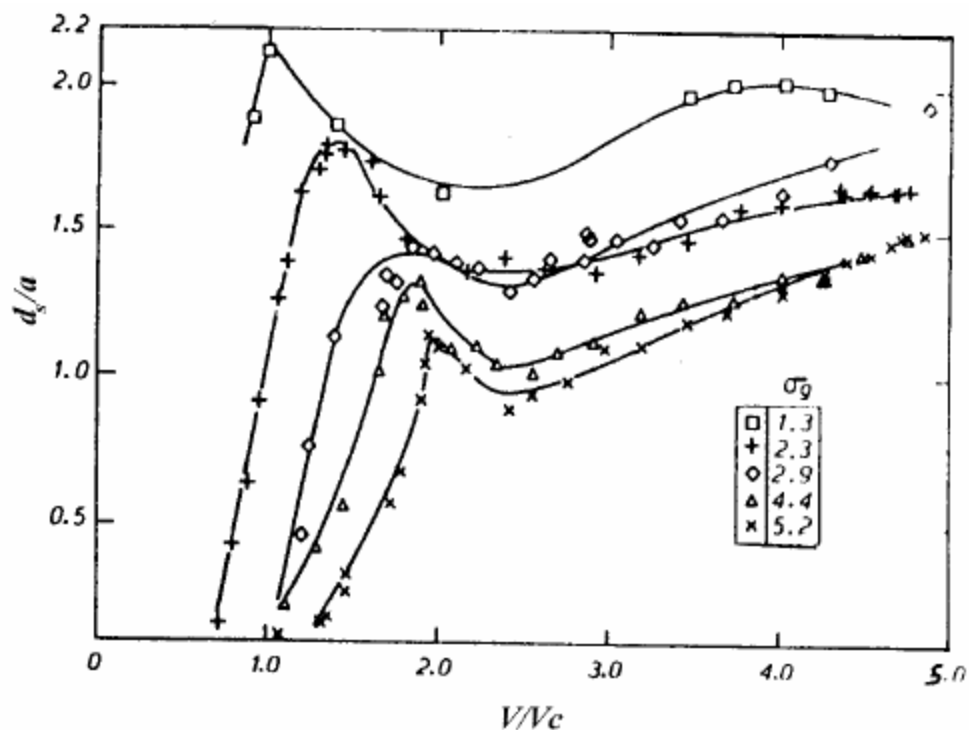


Figura 4-11 Influencia de la desviación estándar geométrica del sedimento y de la profundidad de socavación Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

Según (Guevara, 1998) El lecho de una corriente puede tener estratos con diferente resistencia a la socavación. Si un material relativamente resistente cubre otro más erosionable, grandes profundidades de socavación se esperan si el flujo logra penetrar la capa de material resistente. Por otro lado, si existe en el subsuelo un material altamente resistente a la socavación, resulta innecesario extender la cimentación del puente más allá de su nivel. Las

variaciones en la estratificación no se limitan al sentido vertical, sino que también variaciones en sedimentos a lo ancho de la sección transversal influyen en el proceso de socavación.

4.1.6.9 Tamaño y posición de la cimentación

La localización y el tamaño de la cimentación de la pila tienen un efecto importante sobre el tamaño y la profundidad del hueco de socavación y se relaciona también con la posición que ocupe la pila con respecto al río. Es importante notar que la socavación se reduce si la cimentación se coloca a nivel del lecho original del río y mejor aún se es enterrada un poco más. El conjunto pila/cimentación tiene formas y tamaños tan variados que es difícil generalizar sobre si la socavación aumenta o disminuye para una situación dada. Según algunos investigadores existen tres diferentes condiciones de la fundación se pueden identificar para los cuales los mecanismos que producen socavación varían significativamente. (Guevara, 1998)

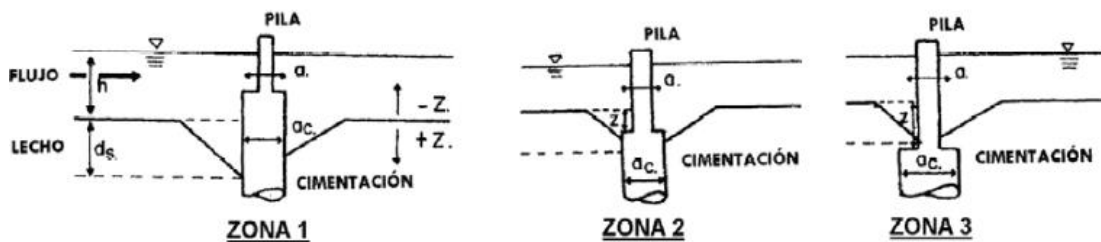


Figura 4-12 Configuración no uniforme de las pilas. Zona 1: tope de la fundación por encima del lecho. Zona 2: tope de la fundación dentro del hueco de socavación. Zona 3: tope de la fundación por debajo del hueco de socavación. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

- Zona 1: El tope de la cimentación está por encima del lecho del río. En este caso, la velocidad del flujo y el tamaño de los sistemas del vórtice dependen de la geometría (ancho de la pila y ancho de la cimentación) y también de la elevación de la cimentación con relación a la profundidad del flujo. La profundidad de la socavación es muy sensible a la elevación superior de la cimentación cuando ésta se encuentra cerca al lecho de la corriente.
- Zona 2: El tope de la cimentación se encuentra dentro del hueco de socavación. En este caso, los sistemas del vórtices creados son más débiles que cuando la cimentación se encuentra por encima del lecho.
- Zona 3: El tope de la cimentación está por debajo del hueco de socavación y por lo tanto la socavación se debe solamente al efecto de la pila.

4.1.6.10 Material Flotante

Según (Guevara, 1998) uno de los problemas comunes son la acumulación de basura o material flotante frente a pilas o estribos, esto genera una alteración del espacio entre pilas y su forma generando que el flujo se mueva con un patrón alterado hacia el lecho lo cual genera un aumento de socavación por el fenómeno de contracción

Se debe tener especial cuidado con pilas formadas con una serie de columnas ya que el área disponible de flujo puede ser fácilmente obstruido por acumulación de desechos, en especial en zonas donde la corriente arrastre grandes ramas o hallan vertimientos de desechos al canal

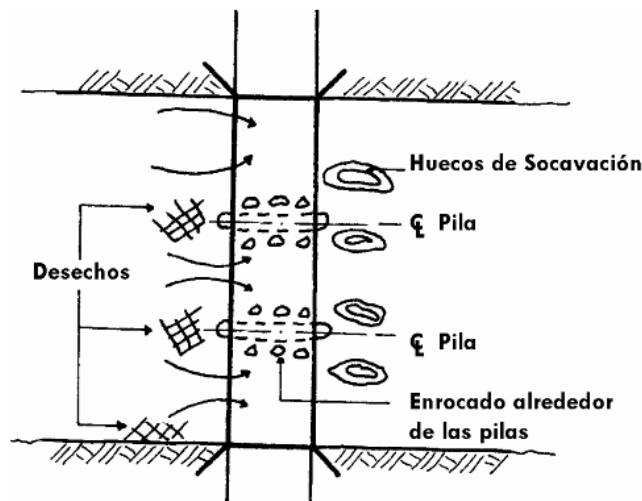


Figura 4-13 Influencia de desechos en la formación de huecos de socavación.

Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

El efecto de la obstrucción puede considerarse, a criterio, incrementando el ancho de la pila, o estimando una reducción en la sección recta del cauce al aplicar las ecuaciones de socavación. Las pilas de forma circular e hidrodinámicas son las que menor posibilidad tienen de acumular basuras, las compuestas por varias columnas pueden considerarse para cálculos de socavación como pilas sólidas y teniendo en cuenta la cantidad de desechos que se presentan en el canal de estudio

Otra característica importante es el tamaño nominal de los desechos presentes en el canal, si los desechos son pequeñas ramas o troncos insignificantes, en un evento de creciente estos pueden ser fácilmente lavados de la sub estructura del puente, pero en el caso en que los desechos sean de considerable tamaño, estos pueden generar cambios significativos en los patrones de flujo lo cual generaría socavación dice (Guevara, 1998)



4.1.6.11 Tiempo del proceso de socavación

Según (Guevara, 1998) la mayoría de las investigaciones de laboratorio de han desarrollado para condiciones límites entre socavación en agua clara y en lecho móvil, ellas reportan que las profundidades de socavación aumentan con el tiempo hasta llegar a un máximo para condiciones críticas de transporte de sedimentos, después de los cual se presenta un descenso hasta llegar a la profundidad de socavación de equilibrio, se ha reportado que la socavación de equilibrio se ha logrado en modelos de laboratorio en tiempos que fluctúan entre 4 horas y 5 días, tiempos que pueden resultar muy poco razonables si se llevan a la escala real del prototipo.

Según (Dargahi, Et al. 1982) la tasa de cambio de transporte de partículas con relación al tiempo t basándose en investigaciones hechas sobre una pila circular bajo condiciones de agua clara con tiempo final de equilibrio t_f igual a 12 horas y se dedujo el comportamiento que se describe a continuación.

- A la máxima tasa de transporte ocurre aproximadamente $t/t_f = 0,02$
- B la tasa de transporte fluctuara en el intervalo $0,1 < t/t_f < 0.5$
- C la condición de equilibrio se logra cuando t/t_f tiende a 1.0

Según (Guevara, 1998) el tiempo requerido por el caudal de diseño para alcanzar las profundidades de socavación estimadas por los métodos disponibles hasta la fecha ya sean profundidades de equilibrio o máximas, es generalmente mucho mayor que el tiempo real que dura la creciente, este es un factor adicional para que muchos de los métodos de cálculo existentes resulten conservadores.

4.1.7 Factores que afectan la socavación local en estribos

Según (Bruce W. Melville, Et al. 2000) la profundidad de socavación de equilibrio para un estribo se puede escribir como:

$$ds = f(\rho_w, \rho_s, u, V, h, D, \sigma_g, g, L, F, \varphi) \quad (3)$$

ds = profundidad de socavación en la pila

f = función de

ρ_w = densidad del agua (se asume constante para casos prácticos)

ρ_s = densidad del sedimento (se asume constante para casos prácticos)

u = viscosidad cinemática (se asume constante para casos prácticos)

V = velocidad media de la corriente

h = profundidad del flujo

D = diámetro característico del sedimento

σ_g = desviación estándar geométrica del sedimento

g = aceleración debida a la fuerza de gravedad

L = Longitud del estribo que se opone al paso del agua

F = parámetro que describe la forma de la pila

φ = ángulo de ataque del flujo que indirectamente considera la longitud de la pila

Al igual que en las pilas, no se tienen en cuenta algunos factores pero sin embargo siguen siendo algunos importantes y que se deben considerar como: Longitud del estribo, Forma del estribo, Ángulo de ataque del flujo sobre el estribo, profundidad y velocidad del flujo dice (Guevara, 1998)

4.1.7.1 Longitud del estribo y profundidad del flujo

Según (Guevara, 1998) los estribos pueden clasificarse en cortos si la longitud que se opone al paso del agua es menor que 1 vez a la profundidad del agua y en largo si es mayor a 25 veces esta profundidad, por lo que la profundidad de socavación en estribos dependen tanto de la longitud como de la profundidad de flujo

Estribos cortos ($L < h$)

$$ds = f\left(\frac{V^2}{gD}, \frac{h}{a}, \frac{D}{a}, \sigma g, F, \varphi\right) \quad (4)$$

Estribos Largos ($L < 25h$)

$$ds = f\left(\frac{V^2}{gD}, \frac{h}{a}, \frac{D}{a}, \sigma g, F, \varphi\right) \quad (5)$$

4.1.7.2 Forma del estribo

En la Figura 4-14 se incluyen las formas más frecuentes de estribos, se tiene que tener en cuenta que mientras mejor se adapte la estructura al flujo menor será la socavación. Estribos con pared inclinada hacia el cauce y con aletas son los que tiene mejor comportamiento

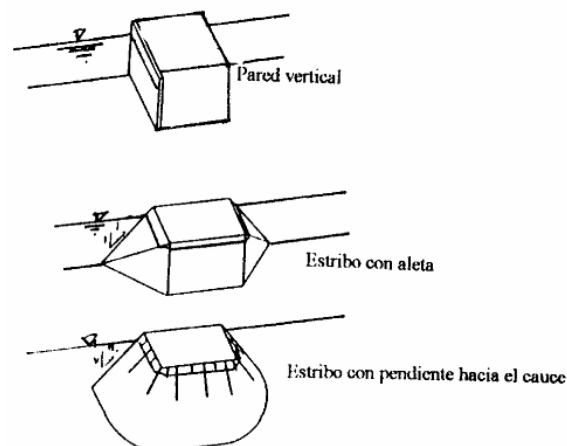


Figura 4-14 Formas comunes de estribos Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

4.1.7.3 Velocidad de la Corriente

Según (Guevara, 1998) la profundidad de socavación va aumentando con la velocidad hasta llegar a la máxima que ocurre bajo condiciones críticas para el inicio de transporte de sedimentos

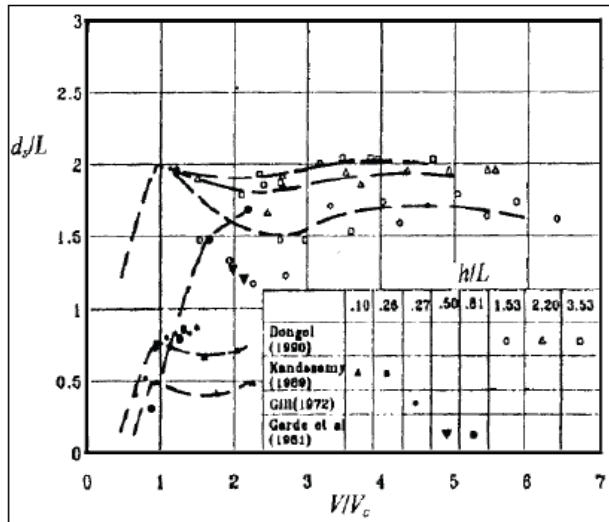


Figura 4-15 Influencia de la intensidad del flujo V/V_c sobre la profundidad de socavación. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

4.1.7.4 Angulo de ataque del flujo

Según (Guevara, 1998) La profundidad de socavación aumenta con el aumento del ángulo de ataque del flujo sobre la estructura. Estribos que apuntan hacia aguas arriba producen mayores profundidades de socavación. Por el contrario, la profundidad de socavación disminuye cuando los estribos apuntan hacia aguas abajo.

La Figura 4-16 ilustra la forma de medir el ángulo de ataque del flujo sobre los estribos. Si los estribos están contruidos en forma paralela, los ángulos de ataque son complementarios y la suma es igual a 180° .

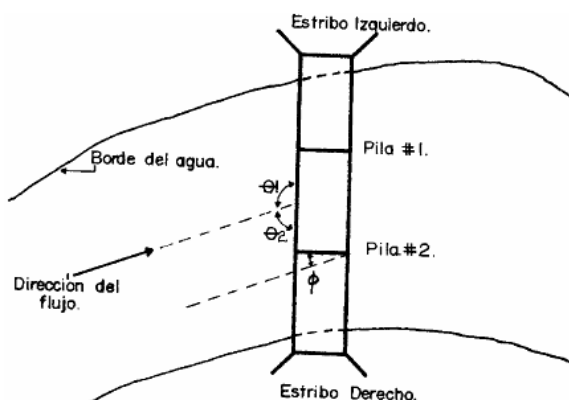


Figura 4-16 Angulo de ataque del flujo sobre el de estribos. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

4.1.7.5 Geometría del cauce

La geometría del cauce dice (Guevara, 1998) es uno de los factores que mayor influencia tiene sobre las profundidades de socavación. Mientras mayor sea la interferencia de la estructura con el flujo mayor será la socavación para el estribo.

La Figura 4-17 ilustra tres casos idealizados de un cauce compuesto formado por secciones transversales prismáticas

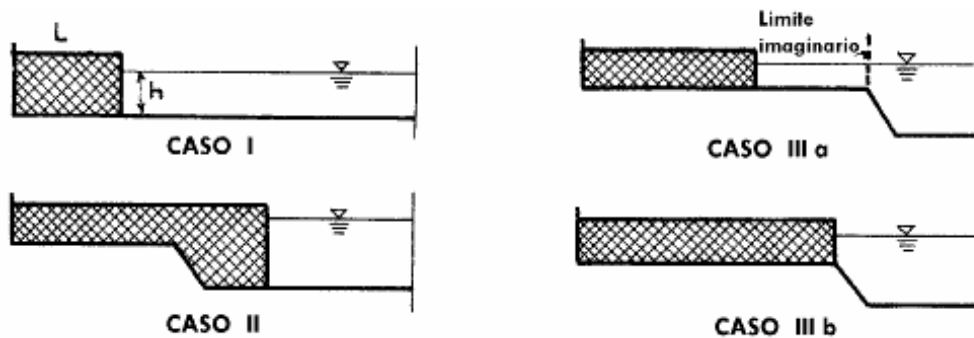


Figura 4-17 Esquema de estribos construidos en cauces compuestos Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

Según la Figura 4-17 se tienen en cuenta 3 casos que deben ser estudiados para el análisis de la socavación

- **Caso 1.** Estribos ubicados en cauces únicos y bien definidos sin zonas de inundación.
- **Caso 2.** Las zonas de aproximación del puente cubren la zona de inundación y se extienden de forma que el estribo queda localizado en el cauce principal.
- **Caso 3a.** Las zonas de aproximación del puente y los estribos se extienden parcialmente en la zona de inundación sin alcanzar a llegar al límite del cauce principal. Esta situación podría entenderse como un caso especial cuando se coloca una línea imaginaria en el borde del cauce principal como se ilustra en la figura 4-17
- **Caso 3b.** Las zonas de aproximación del puente y los estribos terminan en el borde del cauce principal.

4.1.7.6 Características del material del lecho como tamaño gradación y cohesión

Según (Guevara, 1998) en cuanto al tamaño se pueden tener diferentes influencias con respecto a la socavación, pues si se trata de arena este tiene poco efecto en la profundidad de socavación, así como en el caso de partículas grandes que no sean removidas con la corriente, este factor tiene influencia si la partícula puede ser movida por la corriente. También puede ocurrir que en partículas gruesas se acoracen alrededor de la estructura mermando así el efecto de la socavación.

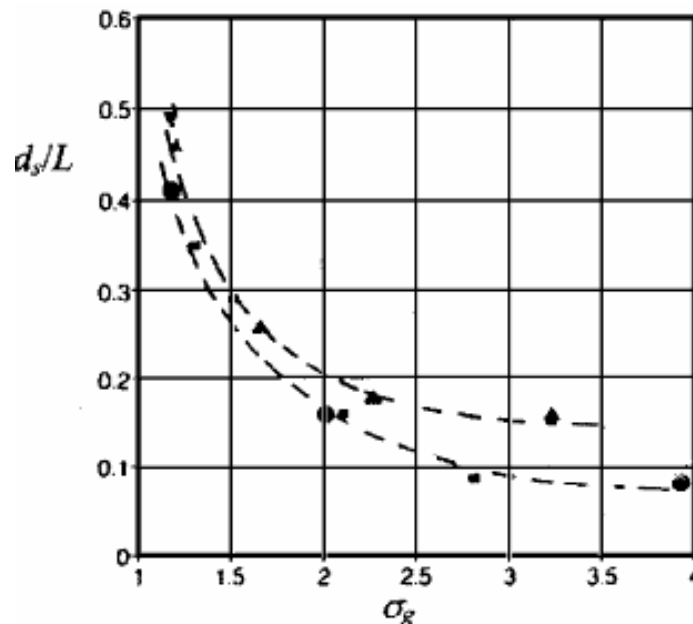


Figura 4-18 Influencia de la gradación del sedimento. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

En conclusión el efecto del tamaño de la partícula no están bien definida ya que los materiales que forman el cauce del río pueden ser desde piedras hasta arenas y arcillas, es decir que el material de los que pueden estar conformados el cauce son complejos y están estratificados tanto en sentido vertical como a través de la sección del cauce

En General se considera que el efecto de sedimentos bien gradados es disminuir la profundidad de socavación Figura 4-18



4.1.8 Escalas para la evaluación de la socavación

El análisis de la socavación es llevado a cabo en niveles descendentes en escalas de espacio y tiempo, partiendo de análisis hidrológicos hasta llegar a análisis más detallados de socavación local.

Según (Parola, A. C., Et al. 1992) la socavación puede ser analizada mediante cinco (5) escalas distintas:

- Escala de cuenca
- Escala de sección de flujo
- Escala de área lejana al puente
- Escala de área cercana al puente
- Escala local

En general, el análisis de la socavación en un puente puede necesitar análisis a diferentes escalas y de tipos distintos en cada nivel. Esto varía dependiendo del sitio, la disponibilidad de datos que se tengan y la demanda de más o menos detalle en cada paso. Por ende esto nos indica que un análisis detallado de un modelo numérico no será requerido en un análisis a un nivel de escala de captación, ya que por medio de correlaciones simples se puede llegar a predecir los parámetros del flujo, y posteriormente estos datos servirán de valores de entrada para predecir la socavación local de forma más detallada.

Sin embargo la escala de aproximación para analizar la socavación es un tanto idealista. Esto se debe al hecho que es imposible predecir la socavación debido a la falta de métodos adecuados y de datos pertinentes. Sin embargo los conceptos proveen un marco muy útil para realizar estimaciones en la socavación durante el diseño de nuevos puentes, además permiten realizar buenas aproximaciones de la socavación producida por un río como conjunto y no limitarse únicamente a las condiciones del sitio.

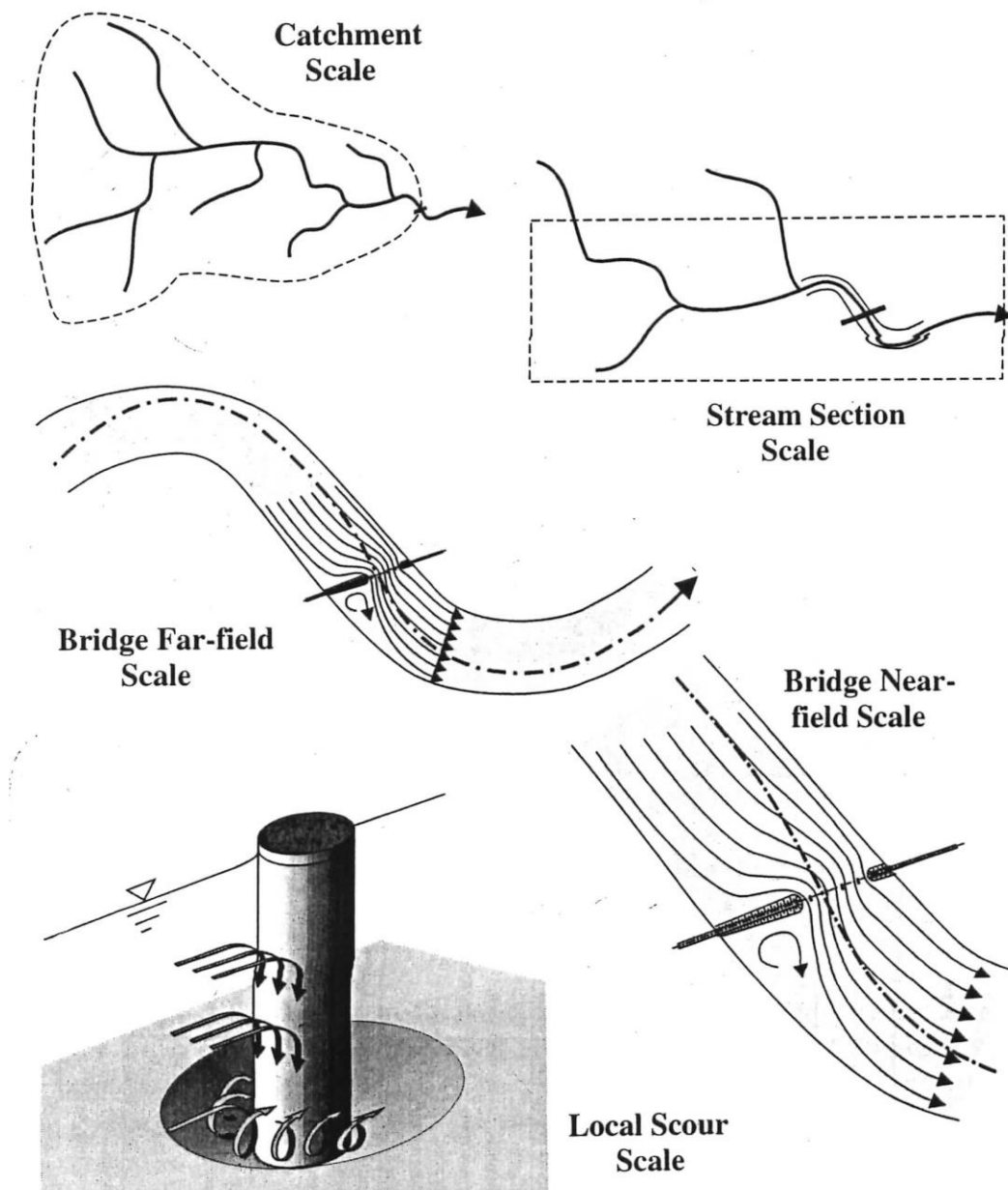


Figura 4-19 Escalas espaciales para la evaluación de la socavación. Fuente: (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

4.1.8.1 Escala de cuenca

La escala de cuenca se utiliza para la derivación de los hidrogramas de flujo de las inundaciones (Q) y la estimación de la producción de sedimentos (Q_s). Las escalas de tiempo pueden variar en la duración del hidrograma durante la vida de diseño del puente. A esta escala el análisis es principalmente realizado en una dimensión, la dirección del flujo e incorpora correlaciones geomorfológicas empíricas. (Bruce W. Melville, Et al. 2000)



4.1.8.2 Escala de sección del flujo

El propósito principal de este análisis es evaluar los cambios geomórficos, tales como migraciones de los meandros, el comportamiento de la agradación /degradación de la planicie de inundación y del canal principal que pueden ser indicios de socavación general en el sitio del puente a largo plazo. La escala de sección de flujo generalmente es tomada como 20 veces el ancho del valle tanto aguas arriba como aguas abajo. Generalmente los datos de entrada a esta escala son el caudal y la producción de sedimentos. A sí mismo el análisis se realiza en una dimensión e incorpora correlaciones geomorfológicas empíricas. (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

4.1.8.3 Escala de área

Esta escala es usada para la determinación la superficie de elevación del agua para el uso de un análisis posterior de socavación, además se usa para la determinación de socavación general a corto plazo, incluyendo erosión de las márgenes que pueden afectar la estructura del puente. Los efectos en un puente ubicado en una curvatura o en la confluencia de distintos cauces pueden ser analizados a este nivel. El límite aguas debajo de la escala de análisis puede ser el primer control hidráulico de la elevación de la superficie del agua en el puente. En esta escala, la escala de tiempo que nos concierne es la duración del hidrograma de crecida o la sucesión de hidrogramas. La cota del agua en el canal puede ser determinada usando modelos de flujo en una dimensión, así mismo el transporte de sedimentos puede ser modelado de ser necesario. (Bruce W. Melville, Et al. 2000)

4.1.8.4 Escala de área reducida

A esta escala el objetivo principal es determinar la contracción de la profundidad de socavación y determinar los parámetros del flujo para determinar la profundidad de la socavación local. El área de afectación se toma aguas arriba y aguas abajo como hasta las secciones del canal donde la velocidad de flujo no se ve afectada por la presencia del puente. La escala de tiempo está dada por el tiempo de inundación o de la sucesión de estas.

Los detalles de la distribución del flujo en la planicie de inundación y en el canal principal deben determinar la cantidad de sedimentos transportado por el flujo. Los análisis a esta escala pueden incluir modelos de laboratorio, correlaciones empíricas para la determinación de la socavación basadas en el caudal. Modelos en dos dimensiones son los más adecuados para realizar un análisis a este nivel. (Bruce W. Melville, Et al. 2000)



4.1.9 Monitoreo e instrumentación de la socavación

Por lo general, los procesos de erosión y socavación en canales se lleva a cabo durante las inundaciones, cuando el flujo de agua se mueve rápido, se acelera cerca de los estribos y pilares del puente (Lu, Et al. 2008). Los dispositivos de detección de socavación permanentes deben ser capaces de soportar la fuerza de la corriente y escombros asociados a las inundaciones. Muchos métodos para medir la erosión son mencionados por (Lu, Et al. 2008).

- Un sistema es el sonar permanente de puente, que proporciona un registro continuo y preciso de los niveles de profundidad del lecho.
- Otro es el sistema Doppler acústico de perfiles, que es portátil y sus mediciones analizan la profundidad del lecho del río. Este sistema no es muy adecuado para flujos con alta turbidez o velocidades de flujo rápidos.
- Un tercer método es la aplicación de GPR (radar de penetración terrestre), que tampoco es muy adecuado para los flujos con alta turbidez o caudales rápidos.
- Un cuarto método implica el uso de fibra de Bragg. Los sensores se colocan a lo largo de una fibra Vertical hebra óptica. Los sensores detectan los cambios en la tensión, especialmente los grandes cambios, que se corresponden a sus iniciales sensores bajo la superficie que se esponga (Chang, Et al. 2004).
- Otro método utiliza ladrillos numerados. Los ladrillos numerados se colocan en un cauce excavado. Entonces, como sedimento se elimina por lavado, los ladrillos numerados flotan a la superficie o se lavan de distancia. La profundidad de socavación se puede encontrar mediante la comprobación de que se mantienen los ladrillos.
- El sexto método es el collar magnético deslizante (SMC) , que utiliza un collar que se desliza hacia abajo al lecho del río y mide la profundidad en determinados eventos.
- otro método es el método de varilla de acero, que mide cómo ahora una barra de acero debe caer al entrar en contacto con el lecho del río.

Un recientemente método mide profundidad utilizando un tubo de acero con filtros en toda la altura (Mercado, Et al. 2008) . El tubo protege el sistema de los escombros y los filtros se utilizan para forzar el aire a través del sistema. Dependiendo de la resistencia medida en los diferentes niveles, la profundidad del suelo (buscar en profundidad) se puede detectar. La ventaja de este tipo de sistema es que se puede soportar grandes inundaciones y ser una solución permanente para los puentes que se someten a inundaciones consistente



(Mercado, Et al. 2008). También puede permitir que los responsables del puente lo cierren antes de una inundación o el colapso (Mercado, Et al. 2008).

4.1.10 Obras de rehabilitación

Las obras de rehabilitación, generalmente requieren de grandes inversiones por parte de los gobiernos locales, en Colombia la entidad encargada de mantener un control y buen estado de las vías es el INVIAS, a continuación se nombran las obras de rehabilitación más comunes a nivel nacional tomadas de (Muñoz E. , 2012)

4.1.10.1 Re nivelación del cauce

Se re nivela el cauce con excavaciones, se traslada el material y por último se compacta esta obra se realiza dependiendo de si viabilidad con expertos en hidráulica de ríos y problemas de socavación de puentes.

4.1.10.2 Reencauzamiento del cauce

En esta actividad se excava para formar encauzamiento así se orientan las líneas de flujo hacia el canal del puente que es vulnerable a la socavación que no está orientado hacia alguno de los lados

4.1.10.3 Gaviones

Estos elementos estructurales se usan para rehabilitar las áreas que han sido socavadas cerca de las pilas, estribos, aletas, terraplenes de acceso, o las márgenes del cauce aguas arriba del puente, en este método se usan colchonetas cerca de del área afectada como pilas o estribos para reducir el efecto de la socavación, el uso de este método depende de la mano de obra y de la profundidad en la que se necesita, son cajas de forma hexagonal forradas por una malla de alambre galvanizado y relleno con grava canto rodado con un tamaño entre 10 y 30 cm no deben contener óxido de hierro, ni compuestos salinos las dimensiones de la caja depende de los esfuerzos que deba resistir y en algunos caso se utilizan tensores internos para asegurar su funcionamiento monolítico se pone inicialmente la primera capa enseguida se coloca la parte superior la cual debe estar bien anclada y en el centro se deberá dejar un espacio libre el cual funcionara como vertedero.

Los gaviones también se usan en problemas con el cauce, la construcciones de espolones en gavión solo se puede hacer con la revisión de profesionales en hidráulica, de ríos hidrológica y estructural.



4.1.10.4 Bolsacretos

Son costales de un material geo textil rellenas de concreto, arena o suelo-cemento dicha bolsa debe ser auto sellante de tal forma que se le pueda inyectar el mortero, esta mezcla debe tener una resistencia mínima de 14MPa. Los bolsacretos deben tener un filtro geo textil y se le debe hacer una análisis de estabilidad al volcamiento y a deslizamiento, se colocar de forma entrelazada de tal manera que cumplan una función parecida a los gaviones protegiendo la infraestructura del puente o las márgenes aguas arriba.

4.1.10.5 Pedraplenes

Están compuestos de canto rodado y son mantas que rodean las pilas y los estribos desde el fondo de la socavación, así evitándola, se usa en las márgenes para reducir la socavación, también como rehabilitación cuando el puente ha fallado por migración y para hacer diques de tal manera que reduce la velocidad del cauce y permite que se acumulen sedimentos cerca de los cimientos de las pilas del puente. Su tamaño depende de la velocidad del cauce y del peso específico de dicho material.

4.1.10.6 Tetrápodos o hexápodos

Este método se usa para reducir la afectación de la socavación, son hechas de concreto reforzado, son muy permeables para romper las ondas las cuales rodean la pila así rompiendo las olas que se aproximan a la orilla, los tetrápodos se diferencian de los hexápodos porque tienen cuatro y seis salientes respectivamente.

4.1.10.7 Recubrimiento o revestimiento del lecho

La función de este método es evitar la erosión de terraplenes, orillas y lechos del cauce recubriendo la zona afectada se vacía concreto para esto de se debe re direccionar el cauce y retirar la máxima cantidad de material suelto que haya en la zona.

4.1.10.8 Pantalla de tablestaca o tubo

Este método es utilizado para la protección de la cimentación de estribos y pilas, también en las orillas de poca altura y de la base de taludes de terraplenes, consiste en el hincamiento de tablestacas o tubos de acero protegiendo las cimentaciones antes mencionadas. Debe salir 1 metro por encima del cauce y debe quedar enterrados 1.5 m.



4.1.10.9 Diques en tubo

La función de este método es reducir la velocidad del cauce y retener los sedimentos, son tubos hincados de forma semicircular alrededor de la pila estos deben tener una longitud de mínimo 3.5 m así sobresaliendo un metro el máximo nivel del cauce y quedar hincado 1.5 m.

4.1.10.10 Escolleras para estribos y pilas

Se utiliza la escollera para proteger las caras del estribo y los rellenos de aproximación el diseño, no depende de la forma del estribo, se extiende desde el pie del estribo. En el momento de realizar este tipo de rehabilitación de deben tener en cuenta el tamaño de la roca con respecto a su densidad, velocidad de flujo y factor de forma de la pila, distribución de tamaños de la roca, espesor de la capa, extensión horizontal y el filtro.

4.1.10.11 Diques de encauzamiento

Este método es óptimo para estribos y para pilas adyacentes ya que tienden a encauzar el flujo de una planicie de inundación al cauce principal, mejora las condiciones de la corriente y guía el flujo, desplaza la socavación aguas arriba del puente, la función de un dique de encauzamiento es que la corriente que pasa bajo el puente sean suaves y las líneas de flujo sean rectas y paralelas. Depende de la geometría del cauce, el caudal, la distancia al puente, la pendiente del lecho y la pendiente de la magnitud libre bajo el puente.

4.1.10.12 Espigones

La función de los espigones es desviar el caudal que llega a las márgenes del cauce, reducir las velocidades del flujo cerca de las laderas, mejorar los alineamientos del cauce, reducir la erosión de las laderas del cauce e inducir el depósito de sedimentos en la zona. Este tipo de obra se hace cuando el cauce tiende a migrar lateralmente y para proteger las laderas, recuperan el terreno perdido estos dependen de su permeabilidad y se clasifican en deflectores que son totalmente impermeables y su uso es desviar el flujo, retardadores/deflectores que tienen una permeabilidad del 35% su función es disminuir la velocidad de flujo cerca de las márgenes y los retardadores que tienen una permeabilidad del 70% este disminuye las velocidades de flujo El diseño se hace según la forma, la orientación, la extensión, la separación, la longitud y la escollera.

4.1.10.13 Construcción de caballetes

Este método consiste un material que no pueda ser socavado durante las crecientes, creando un bloque bajo la cimentación así proporcionando un mejor apoyo al inicial, solo se puede en material con baja proporción de finos ya que los finos no dejan penetrar fácilmente la mezcla.



4.1.10.14 Otras

Hay varios métodos de rehabilitación por socavación a los puentes como fundir concreto bajo la superficie de la cimentación ya que las bases fueron socavadas, para bases parcialmente socavadas hay un procedimiento de rehabilitación incorporando tuberías de nylon en la que se inyecta mortero, otra puede ser incorporando concreto ciclópeo alrededor de las áreas afectadas.

Dichas obras de rehabilitación tomadas de (Muñoz E. , 2012) , conforman un gran gasto para los gobiernos ya que no suponen solamente su construcción, sino su posterior seguimiento y revisión periódica, en el título 4.1.11 factores externos que afectan la estabilidad de los puentes se abordan los temas que influyen directamente en la socavación de los puentes actuales y los que se construirán

4.1.11 Factores externos que afectan la estabilidad de los puentes

Según (Guevara, 1998) La socavación es un problema general de todos los ríos donde se construyan estructuras que de una u otra forma pueden afectar el cauce. Es por ello la necesidad de intentar conocerlo a profundidad, el comportamiento del cauce natural antes de la construcción de una obra como es un puente. Al ser un problema hidráulico fluvial se tiene que tener presente varios aspectos que al final pueden afectar la estabilidad de un puente. Un río se considera en estado de equilibrio cuando no varía el perfil del fondo y de las márgenes del cauce y por lo tanto existe compensación entre los sedimentos que son transportados hacia el sitio y desde el sitio; en estado de erosión o degradación, si el nivel del lecho baja o si las márgenes se desplazan hacia afuera; en estado de sedimentación o agradación, si el nivel del lecho se eleva o si las márgenes se desplazan hacia el interior del cauce, esto ocurre cuando hay excesos de sedimentos en el cauce. A continuación se nombran algunas de las principales consideraciones que poseen influencia sobre la estabilidad del puente obtenidas de (Guevara, 1998)

4.1.11.1 Características y tipo de río.

Según es necesario saber la geometría del cauce, y establecer si el río es relativamente estable o inestable en su forma y cuán sensible es al cambio dependiendo de los materiales del lecho y de las bancas. El río puede ser recto, meándrico o entrenzado; pequeño, mediano o grande; torrencial o aluvial, puede estar en su juventud, en su madurez o ser clasificado como viejo. Cada tipo de río, implica tener en cuenta diferentes consideraciones de diseño,

4.1.11.2 Hidrología.

El registro de caudales y niveles máximos es esencial para el diseño de un ponedero ya que las máximas profundidades de socavación se presentan en condiciones de crecientes tal como se ilustra en Figura 4-20

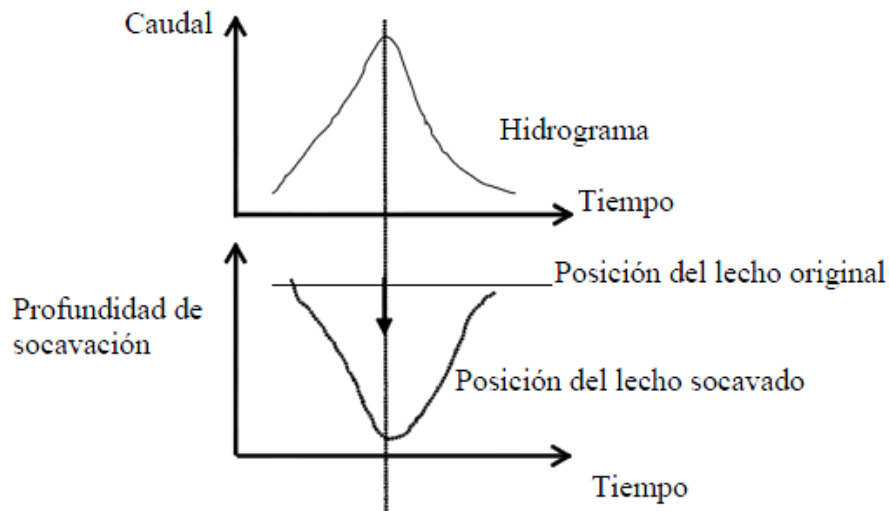


Figura 4-20 Correlación entre hidrograma de crecientes y profundidades de socavación Fuente: (Guevara, 1998)

Es útil conocer así mismo: la distribución de la velocidad a través de la sección transversal del río, cambios en la posición del thalweg, curvas de calibración del río en donde se relacionen niveles del agua en el cauce y caudales. Estas curvas de calibración sirven para fijar las elevaciones y claves de la estructura y de las obras de protección

4.1.11.3 Características de la cuenca de drenaje.

El agua fluyendo en un río y el sedimento transportado están usualmente ligados con la clase de cuenca hidrográfica. Por lo tanto, es necesario estudiar las características geológicas, hidrológicas, topográficas y el uso de la cuenca hidrográfica. La cuenca puede tener entre otros usos: recreacionales, urbanísticos, industriales, agrícolas, control de inundaciones, pastoreo. Es necesario establecer posibles respuestas de la cuenca ante cambios en su uso o en su cobertura vegetal y como estos cambios pueden alterar la estabilidad de un puente.

4.1.11.4 Alineamiento del flujo.

El estudio detallado del comportamiento del río a lo largo del tiempo y con caudales variables es necesario para el correcto diseño y orientación de las estructuras. Las características cambiantes del río en cuanto a niveles de agua, distribución de la velocidad, dirección del flujo, posición del thalweg y forma



tienen un efecto significativo en la intensidad y dirección del ataque a los estribos, las pilas y los terraplenes. Estos factores determinan la importancia y la duración del ataque del agua y por ende, la necesidad de obras de control para hacer que el sistema del río opere aceptablemente dentro de un rango amplio de condiciones. Es también necesario que las estructuras del puente se alineen con la dirección más desfavorable del flujo.

Flujo en las zonas de inundación. El flujo de agua se presenta no solamente en el cauce principal sino también en las laderas y zonas bajas inundables. Los caudales de diseño de un puente usualmente fluyen en ambas zonas y solamente mediante el estudio de las características y la geometría del cauce principal y las zonas de inundación se puede determinar el tipo y la distribución del flujo. El conocimiento de las características del flujo en las laderas y planicies de inundación es básico para el diseño de las zonas de estrechamiento o invasión del cauce por el puente.

4.1.11.5 Localización del ponteadero.

El sitio del puente debe ser parte del sistema de transporte en el área y se selecciona considerando aspectos técnicos, ambientales y económicos. Algunos aspectos a considerar son: longitud del puente, longitud de los estribos, costo de la tierra a adquirir, costos de mantenimiento.

4.1.11.6 Obstrucciones al flujo.

Causas de obstrucciones al flujo que pueden afectar la estabilidad de un puente son: estructuras mal alineadas, estructuras con poca capacidad hidráulica, acumulación de basuras y desechos debido a mal manejo de la cuenca hidrográfica y a pobre mantenimiento del cauce, formaciones del lecho. Todos estos son factores que pueden afectar negativamente la estabilidad de un puente.

4.1.11.7 Estabilización del cauce.

Adicionalmente al análisis de los anteriores factores se debe determinar también la existencia y/o la necesidad de obras de estabilización de las bancas del cauce. La localización y el diseño de varios tipos de estructuras de control fluvial dependen de las características del río y de las condiciones impuestas por el puente.



4.1.11.8 Respuestas a corto plazo.

El estudio de las interacciones puente-río es necesaria para tratar de establecer la respuesta a corto plazo del sistema fluvial ante la construcción de una estructura. La zona del río debe ser considerada tanto aguas arriba como aguas abajo del puente. Las técnicas que se usan en este análisis incluyen desde modelos matemáticos, modelos físicos, relaciones geomórficas cualitativas basadas en principios de la hidráulica fluvial y experiencia y buen criterio del ingeniero.

4.1.11.9 Respuestas a largo plazo.

La respuesta a largo plazo del ponteadero, o de un estrechamiento longitudinal o en el río mismo, deben considerarse basándose en todos los proyectos de desarrollo que se tengan sobre el río, incluida la carretera. Evaluaciones cualitativas, cuantitativas, modelos físicos y computacionales. Estos dos últimos son las mejores herramientas para predecir los cambios en el sistema del río tanto a corto como a largo plazo. Se justifican en proyectos muy importantes ya que la construcción de un modelo demanda mucho tiempo y dinero, además que se requiere de mucha información para su calibración.

4.1.11.10 Selección del sitio.

Los factores antes citados tales como: forma y alineamiento del río, variaciones del río con el tiempo, tipo de material del lecho y las bancas, características hidrológicas e hidráulicas del río, pasado, presente y futuro de las condiciones de la cuenca hidrográfica, etc., tienen su peso en la decisión final sobre la selección del sitio del puente y la evaluación de su estabilidad. Después de hacerse un análisis detenido de los posibles ponederos teniendo en cuenta los anteriores factores, se procede a la determinación de la geometría y longitud de las zonas de aproximación al puente, el tipo y localización de los estribos, el número y localización de las pilas, la profundidad de la cimentación para que sea estable a la socavación, la localización de las zonas de invasión en los planos de inundación, y las medidas de control fluvial para asegurar que el río se ajuste en la mejor forma posible a las condiciones impuestas por el puente.

Las anteriores consideraciones fueron sacadas de (Guevara, 1998) con lo cual se abarcan los principales factores a tener en cuenta en la selección y planeamiento de sitios aptos de construcción de puentes que posean garantías de estabilidad frente a fenómenos de socavación.



4.1.12 Erosión en ríos y corrientes de agua

Las corrientes de agua poseen un comportamiento complejo y dinámico, factores como la cuenca, la geología, el clima y la vegetación entre otros, generan cambios en los patrones del flujo y sus manifestaciones. El sistema está compuesto por distintas zonas, entre ellas encontramos zonas de producción de sedimentos, unas de transporte y otras de deposición.

4.1.12.1 Características morfológicas del canal de una corriente

Para el análisis hidrológico, según (Suárez, 2001) se deben tener en cuenta como mínimo las siguientes características morfológicas

- a) **Longitud del Canal:** Es la distancia medida a lo largo del canal principal de la corriente desde el punto analizado hasta la divisoria de aguas.
- b) **Pendiente del canal:** Se debe tener en cuenta la pendiente promedio y su variación a lo largo del canal.
- c) **Sección transversal:** En esta sección transversal se deben definir algunos parámetros adicionales como perímetro mojado, pendiente al ancho entre otros, incluyendo además el plano de inundación y laderas laterales.
- d) **Forma en planta:** La forma en planta incluye la sinuosidad y patrones de trezados y meandros.

4.1.12.2 Etapas de la corriente de agua

Para el estudio de la socavación y erosión es importante estudiar las etapas geológicas del cauce, ya que estas gobiernan el proceso de arrastre de partículas el cual es uno de los factores más importantes cuando se habla del fenómeno (Suárez, 2001). Esta clasificación está dada por las siguientes etapas:

- Niñez
- Juventud
- Madurez
- Vejez

En la Figura 4-21 se muestra de forma esquemática las diferencias fundamentales de las diferentes edades de un río.

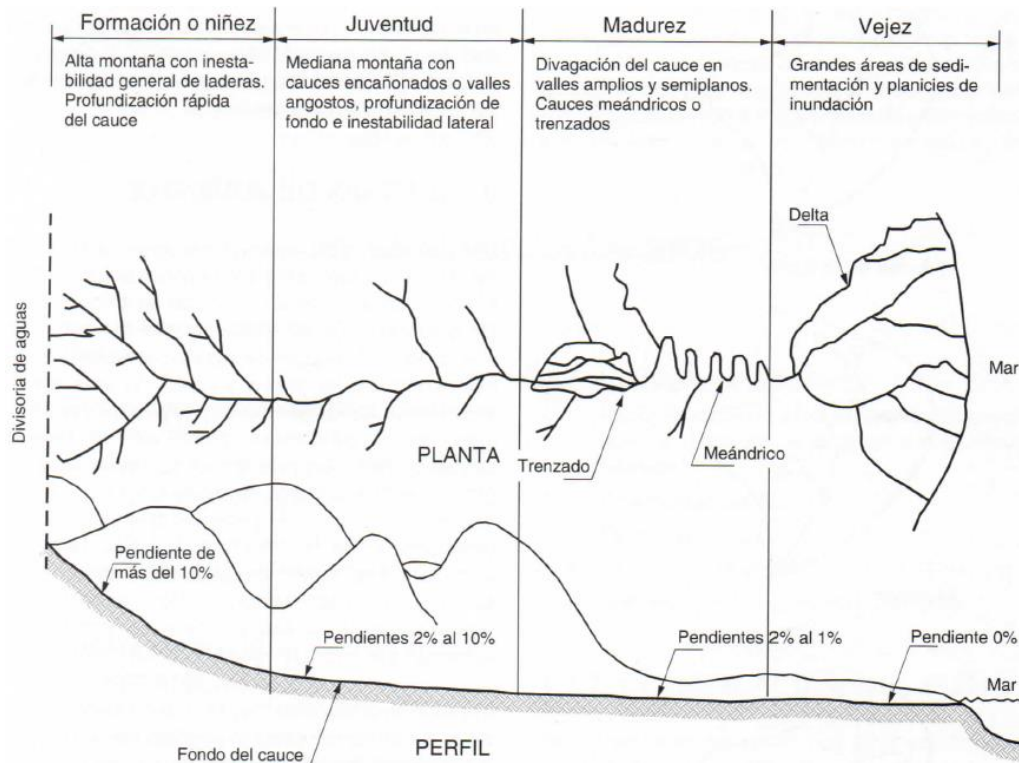


Figura 4-21 Representación esquemática en área de montaña tropical Fuente: (Suárez, 2001)

- Etapa de la niñez: durante esta etapa la cuenca se caracteriza por tener pendientes de más del 6%. Adicionalmente se caracteriza por estar compuesta por varias quebradas y tener forma de embudo (Suárez, 2001). Las lluvias producen corrientes en los cauces y estos se profundizan rápidamente, lo que trae consigo inestabilidad general en las laderas. Estos procesos de erosión se ven acrecentados por procesos de tala y quema en las laderas. En esta etapa los cauces se caracterizan por ser rectos y con cambios bruscos de dirección y pendiente con forma en V y taludes laterales muy fuertes (Suárez, 2001).
- Etapa de la juventud: en esta etapa la corriente tiene como características principales altas velocidades y pendientes medianas. En esta etapa el cauce tiene a profundizarse y debido a este fenómeno se producen deslizamientos laterales y flujos laterales. Es común la presencia de coluviones que al socavarse pueden represar el río y provocar avalanchas de lodo (Suárez, 2001). Adicionalmente la erosión es bastante activa y a pesar de que los materiales del lecho son bastante resistivos los tramos del río tienden a ser rectos (Muñoz E. , 2012).



- Etapa de la madurez: en la etapa de madurez la erosión del fondo durante una creciente es momentánea, esto se debe al hecho que al disminuir la velocidad del agua recupera los sedimentos. Estos procesos de socavación, transporte controlan en buena parte el comportamiento del río (Suárez, 2001). La corriente trata de ampliar su cauce y la energía es utilizada en procesos de erosión lateral lo que implica la formación de meandros, trenzamientos y divagación (Suárez, 2001). Las velocidades del flujo son más bajas pero la erosión es muy activa, pero también se presentan varios procesos de sedimentación (Muñoz E. , 2012).
- Etapa de la vejez: en esta etapa el río entrega sus aguas al mar, la pendiente del río es prácticamente cero y es común la formación de deltas. No hay erosión vertical pero hay gran movimiento lateral de los cauces debido a la sedimentación e inundaciones, en esta etapa es mucho más importante la sedimentación (Suárez, 2001).

4.1.12.3 Morfología fluvial

La morfología fluvial es el estudio científico de la forma y estructura de la geología física de los ríos, la morfología del río es el resultado de los distintos procesos que tiene lugar en la cuenca del río (Suárez, 2001).

4.1.12.3.1 Perfil longitudinal del río

Generalmente los perfiles longitudinales de los ríos son de forma cóncava, disminuyendo desde la zona de máxima erosión en la parte alta del río a las de depositación en la parte baja (González, Et al. 1995) A medida que se avanza a lo largo del canal, la degradación y el transporte de sedimentos de gran tamaño se reduce, esto se debe principalmente a la reducción en la velocidad y la disminución en la capacidad de arrastre del río.

Según (Suárez, 2001), los cambios bruscos en la pendiente se deben principalmente a:

- Cambios geológicos
- Confluencia de ríos
- Erosión o sedimentación remotamente por efecto de la intervención antrópica del puente (Fenómeno de socavación en puentes)

4.1.12.3.2 Sección transversal del río

En los ríos la forma de la sección transversal depende del sitio en el canal, de su geometría en planta, del tipo del canal y sus sedimentos. La sección transversal en una curva es más profunda del lado exterior, en cambio en los sectores rectos el canal tiende a ser más trapezoidal o rectangular, sin embargo siempre existe un sitio de mayor profundidad correspondiente al thalweg véase Figura 4-22

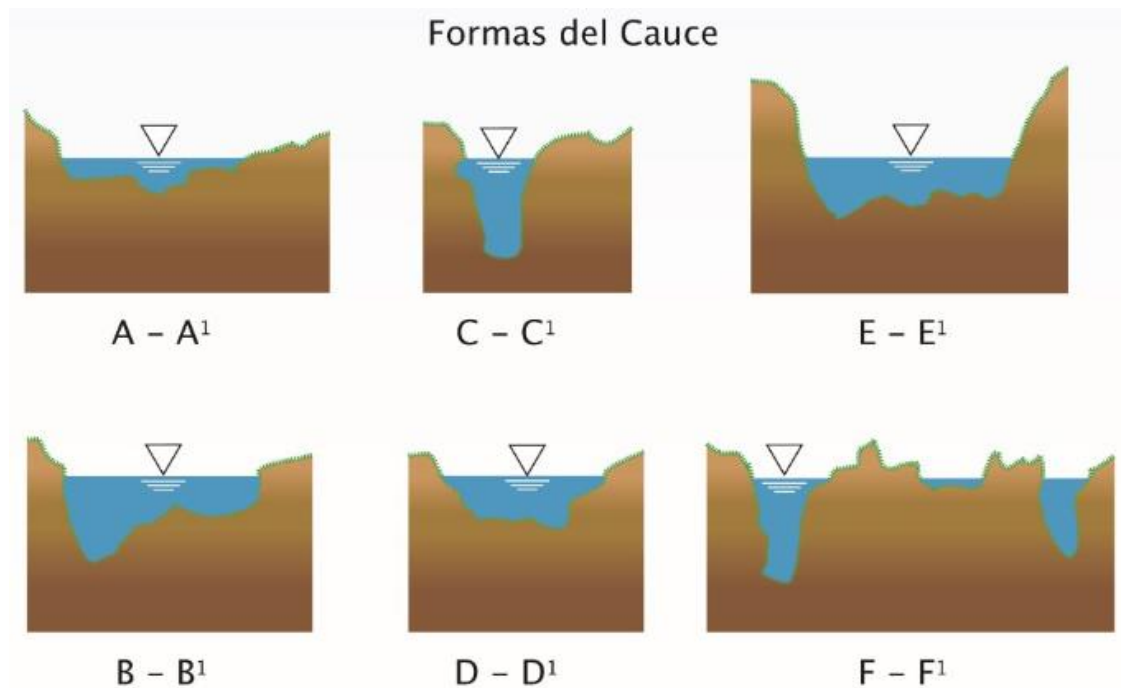


Figura 4-22 Formas del cauce del río Fuente: (Muñoz E. , 2012) adaptado de (Suárez, 2001)

4.1.12.4 Clasificación de los canales

En los ríos encontramos tres tipos principales de canales:

- Canales semirectos
- Canales trezados o errantes
- Canales meándricos

4.1.12.4.1 Canales semirectos

Los cauces rectos no son muy comunes en la naturaleza y se presentan principalmente a lo largo de tramos cortos, se caracterizan por tener bajas pendientes y baja sinuosidad (Muñoz E. , 2012). En los cauces semirectos existe una tendencia a la profundización del cauce principalmente en las zonas

donde hay velocidades altas, la erosión ocurre a lo largo de los pozos y la sedimentación ocurre a lo largo de los playones, véase Figura 4-22

4.1.12.4.2 Canales trenzados o errantes

Estos cauces poseen varios brazos que se entrelazan y separan dentro del cauce principal, debido a cambios de pendiente longitudinal y transversal. Se caracterizan principalmente por poseer lechos amplios, rápidos y continuos, y altas pendientes (Muñoz E. , 2012), adicionalmente presentan cambios en la sedimentación y en la posición de los brazos por lo que se forman islas distribuidas lateralmente. Este tipo de cauce se encuentra principalmente en zonas montañosas en las corrientes de los abanicos aluviales y en los arroyos de las planicies glaciares véase Figura 4-23

4.1.12.4.3 Canales meándricos

Los canales meándricos se caracterizan principalmente por poseer depresiones o pozos bien definidos, generalmente se pueden apreciar curvas bien definidas y pronunciadas, en los casos que el río tenga curvas muy irregulares y pronunciadas se considera sinuoso pero no meándricos (Muñoz E. , 2012). Las curvas varían con el tiempo lo que constituye el proceso conocido como meandricación véase Figura 4-23 (Suárez, 2001)

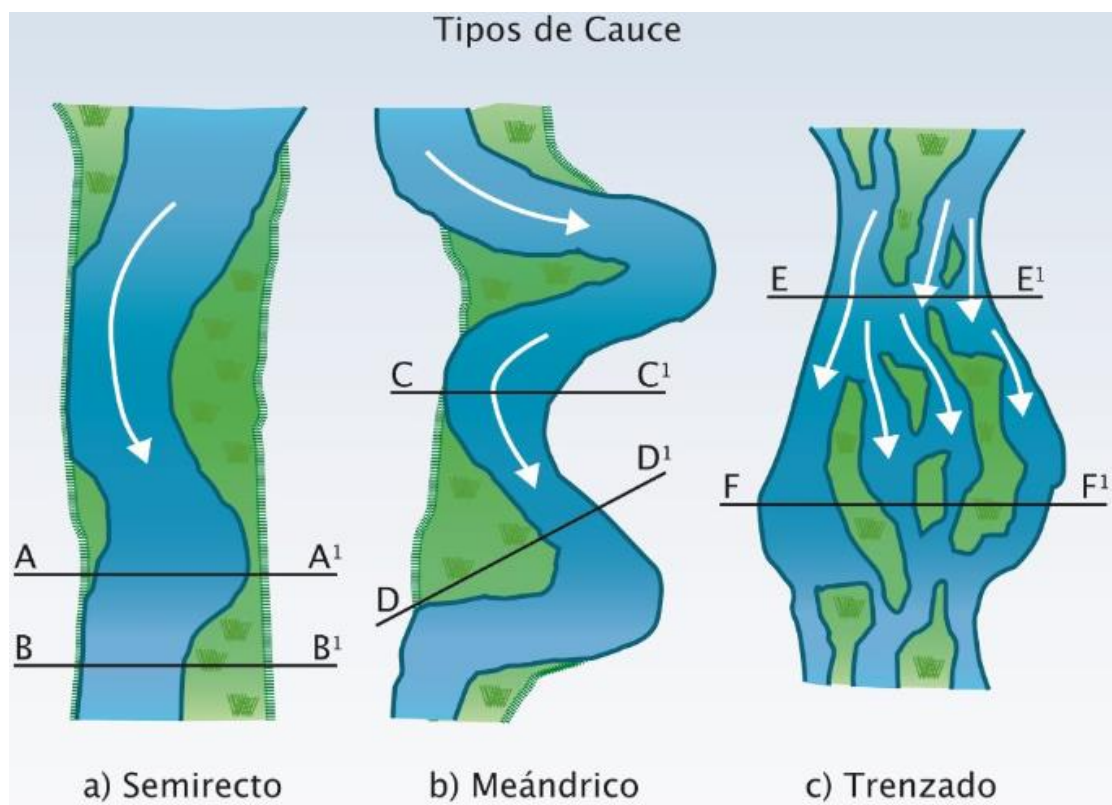


Figura 4-23 Tipos de cauce Fuente: (Muñoz E. , 2012) adaptado de (Suárez, 2001)



4.1.13 Efectos de la geología

4.1.13.1 Producción de sedimentos

La cantidad y características de los sedimentos en un cauce dependen principalmente de la geología, de características como la litología, estructura y meteorización. Las rocas metamórficas producen altas cantidades de sedimentos mientras que rocas como la arenisca producen muy pocos sedimentos. Las arcillolitas facilitan la producción de arcillas y limos.

4.1.13.2 Erodabilidad de los materiales

En los cauces de los ríos generalmente los materiales que han sido recientemente depositados presentan una mayor erosionabilidad que los materiales antiguos. Sin embargo es muy probable que se encuentren distintos tipos de materiales y edades geológicas a lo largo de un cauce y aunque se tenga muy bien estudiado el tema del comportamiento de las corrientes, se tiene muchas variables que actúan de forma simultánea lo que dificulta el cálculo del proceso de erosión y sedimentación. A continuación se presenta una tabla donde se muestra el tipo de material según la edad geológica del depósito.



Tabla 4-2 Principales divisiones de los tiempos geológicos, rocas tipo y afloramientos principales. Fuente: (I. Cantarino, 2001)

M.A.	ERA	SISTEMA	SERIE	PISOS	ROCAS TIPO (Facies)	AFLORAMIENTOS PRINCIPALES	REGISTRO FÓSIL	OROGENIAS					
								C	Fases				
0.01	CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	Postglaciar	Aluviales-Coluviales	Cursos fluviales	Actual	Neocócnica	Rodánica				
0.08			PLEISTOCENO	SUP.	Versiliense	Gravas, arenas y limos	Márgenes de cursos fluviales			Hominidos			
0.12				Tirreniense	Loess y turba		Mamuts						
0.35				MED.	Siciliense	Terrazas fluviales y marinas	Zonas costeras			Oso de las cavernas			
0.6			INF.	Calabriense	Playas levantadas		Equidos (<i>Equus</i>)						
2.0				Piacenziense	Depósitos fluviales (<i>rañas</i> : gravas cuarcíticas empastadas en matriz arcillosa)	Montes de León	<i>Elephas</i>						
5.0		Zancleniense			Submeseta Norte								
23		TERCIARIO	NEÓGENO	PLIOCENO	Messiniense	Calizas de los páramos	DEPRESIONES INTERIORES (zona central): Duero / Tajo	MOLUSCOS: Bivalvos (<i>Pecten</i> , <i>Ostrea</i> .) y Gasterópodos	Ática	Estirica			
				MIOCENO	SUP.	Tortonense	Margas y yesos				Equinidos (<i>Clypeaster</i>)		
					MED.	Helvetiense	Arcillas				Microforaminíferos		
			INF.		Burdigaliense	Margas	Ebro	Mamíferos					
			PALEÓGENO	OLIGOCENO	SUP.	Aquitaniense	Areniscas	Guadalquivir				Sálica	
					MED.	Chattieniense	Conglomerados calcáreos, areniscas, yesos	DEPRESIONES INTERIORES			FORAMINIFEROS: <i>Nummulites</i> y <i>Alveolina</i>		
INF.		Priaboniense			Areniscas y yesos	Bordes o áreas marginales (ambientes proximales de abanicos aluviales)	MOLUSCOS: Bivalvos y Gasterópodos (<i>Planorbis</i>)						
34		TERCIARIO	PALEÓGENO	EOCENO	SUP.	Bartonense	Calizas y margas		Pirenaica				
					MED.	Luteciense	<i>Flysch</i> : alternancia de calizas/margas						
					INF.	Ypresiense							
					Thaniense	Areniscas		Mamíferos					
					65	PALEOCENO	Daniense	Calizas				FLORA: Fanerógamas	
					MESOZOICO	CRETÁCICO	SUP.	SENOIENSE			Maastrichtiense	Conglomerados	CORDILLERAS ALPINAS
Campaniense		Brechas calcáreas	(aprox. Hispania calcárea: 1/3 oriental península)										
		Santoniense	Margas	Cordillera Cantábrica									
		Coniaciense	Calizas	Sector oriental (Burgos-Santander: Castro Valnera, Montes Vascos,...)									
INF.	Turonense	Calizas y dolomías masivas											
	Cenomaniense	Calcarentas											
	Albiense	Arcosas, arenas silíceas (<i>F. Utrillas</i>)											
	Aptiense	Calizas (<i>F. Urgoniana</i>)											
	Barremiense	Conglomerados, arenas silíceas, areniscas y arcillas (<i>F. Weald</i>)											
	Hauteriviense												
130	TERCIARIO	PALEÓGENO	NEOCOMIENSE	Portlandiense			Calizas, areniscas y arcillas (<i>F. Pärbeck</i>)			Neo-kimmérica			
				Kimmeridiense			Calizas masivas y ritmitas						
				Oxfordiense		Margas							
				Calloviense		Calizas y margas							
				Bathonense		Calizas masivas							
				Bajociense									
150	TERCIARIO	PALEÓGENO	JURÁSICO	SUP.		Toarciense	Calizas y margas		Eo-kimmérica				
				MED.		Phliensbachiense	Calizas y dolomías tableadas						
						Sinemuriense	Calizas y dolomías querosas (<i>Carmiolas</i>)						
						Keuper	Arcillas abigarradas y yesos						
				INF.		Muschelkalk	Calizas, dolomías y margas						
						Buntsandstein	Areniscas (cuarcitas, rodenos) Arcillas rojas						
Permo-Trias	Conglomerados de base Areniscas												
245	PALEOZOICO	PÉRMICO	SUPERIOR	Thuringiense	Serie detríticas con intercalaciones de rocas volcánicas	MACIZO IBÉRICO	Desarrollo reptiles	Ciclo HERCÍNICO	Palatinica				
				Saxoniense		Zona Cantábrica							
				Estefaniense	Moladas	Zona Asturoccidental-leonesa							
				Westfaliense	Granitos	Zona Centroibérica							
				Namuriense	Calizas (c. de montaña)	Zona de Ossa-Morena							
				Dinantense	Pizarras y areniscas (<i>F. Culm</i>)	Zona Sudportuguesa							
		360	PALEOZOICO	DEVÓNICO	SUPERIOR	Fameniense	Calizas y dolomías nodulosas	NÚCLEO DE LAS CORDILLERAS ALPINAS	Goniatites, Fusulinas.	Ardénica			
						Frasniense	Areniscas rojas	Zona Axial Pirenaica	Braquiópodos (<i>Spirifer</i>)				
						Givetiense	Granitos	Cordillera Ibérica: Sierra de la Demanda, Macizo de Ateca, Macizo de Calatayud-Montalbán	Peces acorazados				
						Emsiense			Criptógamas				
						Siegeniense							
						Gediniense							
400	PALEOZOICO	SILÚRICO	SUPERIOR	Ludlowiense	Pizarras (con graptolites)		Peces	Tacónica					
				Wenlockiense	Calizas	Sistema Central:	Graptolites, 1ª plantas						
				Llandoveryense		Guadarrama, Gredos	Arrecifes coralinos						
				Ashgillense	Pizarras y cuarcitas	Cadenas Costero-Catalanas:	Graptolites, Ortoceratidos.						
				Arenigiense	Granitos	Priorato-Prades, Montseny	Braquiópodos (<i>Orthis</i>)						
				Tremadociense	Cuarcita armoricana		Cruziana y Fraena						
495	PALEOZOICO	ORDOVICIANO	SUPERIOR	Postdamiense	Cuarcitas y pizarras			Sarda					
				Acadiense	Dolomías y mármoles								
				Georgiense									
530	PALEOZOICO	CÁMBRICO	MEDI	Ediacara	Gravacvas y gneises	NÚCLEOS ANTIFORMES HERCÍNICOS	Algas calcáreas	Eo-kimmérica					
				Varanger	Formaciones porfiroides (<i>ollo de sapo</i>)	Galicía y Norte de Portugal	Estromatolitos						
							Fauna Ediacara						
2600	PRECÁMBRICO	PROTEROZOICO	VENDIENSE				Bacterias de Fig Tree						
3600	PRECÁMBRICO	ARCAICO											

© ICantarino 2001

Adicionalmente a lo largo de un cauce se presenta movilidad del fondo y las márgenes, esto se debe principalmente a la variación del caudal, lo que provoca una variación continua de la sección y amplitud de la corriente. Cuando el río sufre una modificación en la carga de sedimentos puede aumentar su inestabilidad provocando un incremento en la erosión y sedimentación hasta que alcance su equilibrio.

4.1.13.3 Efectos de la intervención antrópica

Las modificaciones en los caudales y carga de los sedimentos por la deforestación que aumenta la carga de sedimentos y prácticas de cultivos producen alteraciones importantes en el régimen del río lo que provocan una gran inestabilidad en los procesos erosivos (Suárez, 2001). Adicionalmente la construcción de obras que interfieren con el cauce produce una modificación en la corriente.

4.1.13.3.1 Construcción de puentes

La construcción de un puente produce encauzamiento aguas arriba y direccionamiento del cauce modificando principalmente la hidráulica local ver Figura 4-24 .Sin embargo aunque se produce encauzamiento del flujo el río intenta recuperar su condición natural (Suárez, 2001) lo que provoca muchas veces que se produzca el fenómeno de socavación y el colapso de los puentes.

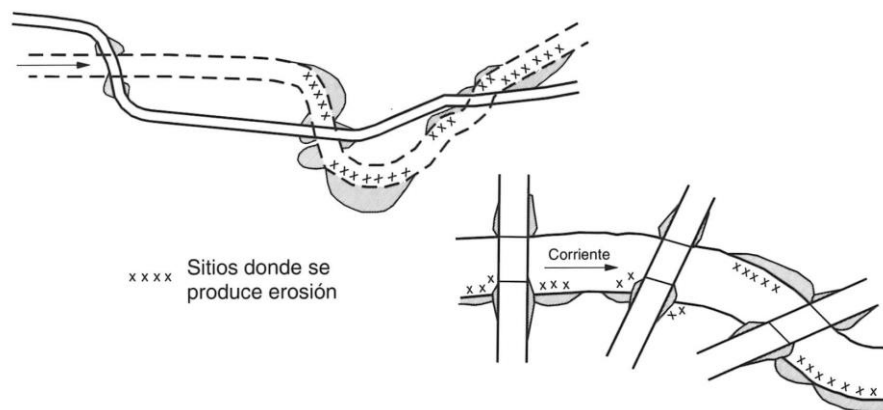


Figura 4-24 Sitios en los cuales se produce erosión lateral por la construcción de puentes Fuente: (Suárez, 2001)

Es por esta razón que se debe modificar lo menos posible el cauce y tratar de ubicar los puentes en zonas donde el cauce es semirecto tratando de formar un ángulo de 90 grados con el cauce. Adicionalmente se debe tener cuidado en dejar espacio suficiente para que el río no afecte los terraplenes de acceso durante las crecientes, es decir evitar que los terraplenes invadan las planicies de inundación.



Es importante tener en cuenta que un río se encuentra en un intercambio continuo de partículas y procesos de erosión, cuando la cantidad de material arrastrado es igual a la cantidad de material depositado el río se encuentra en equilibrio, sin embargo cuando hay una alteración en este intercambio el río tendera a recuperar su equilibrio natural lo que puede causar un incremento significativo en la erosión o agradación de los lechos bajo los puentes.

4.2 CONCEPTOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO

El riesgo es la probabilidad de que se produzca un fenómeno de origen natural o humano capaz de desencadenar un desastre (Garcia, 2011), para el caso de este estudio en particular se analizara el riesgo de que se produzca el colapso de un puente por socavación. Es por esta razón que se están teniendo tanto factores naturales como lo son las amenazas provocadas por geología de la cuenca y la precipitación y amenazas que están directamente condicionadas por el hombre como lo son las crisis invernales y la erosión producida en la cuenca a causa del uso del suelo. Así mismo la vulnerabilidad es la condición en virtud de la cual una población está expuesta o en peligro de resultar afectada por la amenaza (Garcia, 2011)

Como se mencionaba anteriormente el riesgo es la probabilidad de que ocurra un desastre y es el resultado de juntar la amenaza con la vulnerabilidad, de lo cual obtenemos la siguiente expresión:

RIESGO= AMENAZA x VULNERABILIDAD

Cabe resaltar que la vulnerabilidad debe ser evaluada específicamente frente a cada amenaza en particular y frente a las condiciones particulares de cada comunidad, sin embargo también puede ser analizado como la capacidad de una comunidad para enfrentar un desastre.

4.2.1 Evaluación de riesgos

El termino riesgo se refiere principalmente a la teoría de posibilidad de daño (Garcia, 2011), es decir el riesgo es el efecto combinado de todas las causas. El análisis de riesgo está dirigido al desarrollo de estrategias de gestión o gerencia de riesgos, de allí que sea de gran importancia su aplicación en la metodología de priorización y la aplicación de un SIG con el fin de potenciar su validez.

Adicionalmente el uso de un SIG permite reducir los tiempos de recolección de información, incrementar el tiempo de manejo de datos y disminuir el tiempo para el análisis de datos (Welsen, 2009). El riesgo es un problema espacial (Welsen, 2009) donde se analizan los diversos factores, es por este motivo que uno de las labores principales a la hora de la evaluación de riesgo es la



creación de mapas. En estos mapas se identifican principalmente las zonas o puntos vulnerables que se encuentran en mayor riesgo frente a una amenaza en particular, en este caso la socavación de los puentes.

La creación de estos mapas de riesgo tienen varias ventajas entre ellas la identificación de amenazas y peligros, adicionalmente nos permite no solo identificarlos si no también ubicarlos, ayudan con la priorización y toma de decisiones y llevar un control de registros históricos.

Finalmente el objetivo del análisis de riesgo, amenaza y vulnerabilidad es la priorización y la toma de decisiones.

4.2.2 Antecedentes y preparación del análisis

Para poder realizar un análisis pertinentes se deben evaluar principalmente los siguientes factores. En primer lugar se deben identificar los elementos relevantes en el estudio con el fin de optimizar las condiciones. Para cumplir este objetivo se debe hacer un listado de los elementos a ser analizados y las amenazas a las cuales serán sometidos. En el desarrollo de la tesis estos elementos son los puentes y las amenazas son las producidas por los distintos parámetros definidos en la socavación.

Adicionalmente se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones para el análisis de la amenaza utilizando SIG (Welsen, 2009):

- El tipo de amenaza a estudiada
- El método de análisis que será utilizado
- La escala del estudio
- Disponibilidad de recursos

Como datos básicos de amenaza se deben contar con mapas de topografía, registros históricos de eventos y mapas relevantes para el análisis particular de cada amenaza como los son los mapas

Finalmente se debe sintetizar la información y presentar los mapas definitivos de riesgo ante la socavación. Es importante aclarar que los mapas de amenaza por precipitación deben ser constantemente actualizados ya que son parámetros “dinámicos” que están variando con el tiempo y las condiciones climáticas.



4.3 Conceptos básicos de sistemas de información geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) es una colección organizada de hardware, software, datos geográficos y personal, diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestre y construido para satisfacer unas necesidades concretas de información. (Turmero, 2007)

Un Sistema de Información geográfico (SIG) particulariza un conjunto de procedimientos sobre una base de datos no gráfica o descriptiva de objetos del mundo real que tienen una representación gráfica y que son susceptibles de algún tipo de medición respecto a su tamaño y dimensión relativa a la superficie de la tierra. A parte de la especificación no gráfica el SIG cuenta también con una base de datos gráfica con información georeferenciada o de tipo espacial y de alguna forma ligada a la base de datos descriptiva. La información es considerada geográfica si es medible y tiene localización. (Turmero, 2007)

En un SIG se usan herramientas de gran capacidad de procesamiento gráfico y alfanumérico, estas herramientas van dotadas de procedimientos y aplicaciones para captura, almacenamiento, análisis y visualización de la información georeferenciada. (Turmero, 2007)

La mayor utilidad de un sistema de información geográfico esta íntimamente relacionada con la capacidad que posee éste de construir modelos o representaciones del mundo real a partir de las bases de datos digitales, esto se logra aplicando una serie de procedimientos específicos que generan aún más información para el análisis. (Turmero, 2007)

La construcción de modelos o modelos de simulación como se llaman, se convierte en una valiosa herramienta para analizar fenómenos que tengan relación con tendencias y así poder lograr establecer los diferentes factores influyentes. (Turmero, 2007)

4.3.1 Componentes de un SIG

Para comprender mejor el funcionamiento de un SIG es importante conocer cuáles son los componentes que lo constituyen, un SIG se puede ver como una caja negra, pues manipula datos de realizarle en nuestro caso localizaciones en un espacio físico (Turmero, 2007)



- **Hardware** Es el equipo y los periféricos en los cuales el SIG opera, puede ser desde una estación de trabajo hasta un servidor centralizado, los equipos pueden operar en modo stand alone o networked configuration, algunos ejemplos de hardware pueden ser : computadoras , redes, dispositivos periféricos, impresoras, plotters y digitalizadores
- **Software** es el que provee las funciones y herramientas que el usuario necesita para almacenar analizar y mostrar la información geográfica, los componentes de software clave son : Software SIG, software de SO y software de red, recordando que el software SIG se considera al software comerciales y al software abierto
- **Datos** uno de los componentes más importantes de un SIG son los datos. es absolutamente esencial que la información sea precisa, algunos diferentes tipos de datos son : Datos vectoriales, datos raster, datos de imágenes, datos de atributos
- **Gente** La tecnología SIG es claramente de valor limitado sin la gente que administre el sistema y desarrolle planes para su aplicación. Los usuarios SIG pueden ser desde especialistas técnicos calificados hasta planeadores y analistas de mercado, quienes usen los SIG para ayudarse con sus tareas diarias. Ejemplo de gente SIG puede ser: Administradores, Gerentes, Técnicos SIG, Expertos de aplicación, usuarios finales, consumidores, geólogos, urbanistas, arquitectos e ingenieros
- **Métodos** Los métodos son planes bien diseñados y reglas de negocio específicas de la aplicación que describen como la tecnología es aplicada, esto incluye: pautas , especificaciones, estándares y procedimientos

4.3.2 Funciones de los elementos de un sistema de información geográfico

Dentro de las funciones básicas de un sistema de información podemos describir la captura de la información, esta se logra mediante procesos de digitalización, procesamiento de imágenes de satélite, fotografías, videos, procesos aerofotogramétricos, entre otros. (Turmero, 2007)

Otra función básica de procesamiento de un SIG hace referencia a la parte del análisis que se puede realizar con los datos gráficos y no gráficos, se puede especificar la función de contigüidad de objetos sobre una área determinada, del mismo modo, se puede especificar la función de coincidencia que se refiere a la superposición de objetos dispuestos sobre un mapa. (Turmero, 2007)

La manera como se agrupan los diversos elementos constitutivos de un SIG quedan determinados por una serie de características comunes a varios tipos de objetos en el modelo, estas agrupaciones son dinámicas y generalmente obedecen a condiciones y necesidades bien específicas de los usuarios. (Turmero, 2007)



La definición formal del concepto categoría o cobertura, queda determinado como una unidad básica de agrupación de varios mapas que comparten algunas características comunes en forma de temas relacionados con los objetos contenidos en los mapas. Sobre un mapa se definen objetos (tienen una dimensión y localización respecto a la superficie de la tierra), estos poseen atributos, y éstos últimos pueden ser de tipo gráfico o de tipo alfanumérico. (Turmero, 2007)

A un conjunto de mapas relacionados se le denomina entonces categoría, a un conjunto de categorías se les denomina un tema y al conjunto de temas dispuesto sobre un área específica de estudio se agrupa en forma de índices temáticos o geoíndice del proyecto SIG. De tal suerte que la arquitectura jerárquica de un proyecto queda expuesta por el concepto de índice, categoría, objetos y atributos. (Turmero, 2007)

Para ilustrar lo anterior con un ejemplo, puede decirse que el índice para el Valle de Aburrá lo representa la rejilla de escala 1:2000, esto da como resultado 270 planchas desde el Municipio de Caldas hasta el Municipio de Barbosa. (Turmero, 2007)

Las categorías definidas pueden ser los puntos de control, el modelo de formación y conservación catastral, la categoría transporte, las coberturas vegetales, la hidrología, el relieve y áreas en general.

Los objetos para la categoría puntos de control son: el punto geodésico, el punto de nivelación, el punto estereoscópico, entre otros. Para ilustrar con otro ejemplo, los objetos para la categoría catastro son: Zona urbana, Sector Urbano, Manzana, Edificación, Parque, Sitio de interés, entre otros. (Turmero, 2007)

Los atributos para el objeto zona urbana son: El código de identificación del departamento, código del municipio, código de la zona urbana, entre otros. Ahora bien, la representación gráfica del objeto zona urbana son tramos de línea continua separados por triángulos para delimitar la zona propiamente dicha. (Turmero, 2007)



5 METODOLOGIA

A lo largo del mundo se han desarrollado diversos métodos para la detección análisis y medidas contra la socavación, esto se lleva a cabo con el fin de poder detectar los puentes más susceptibles ante el fenómeno de la socavación y de esta manera poder tomar las medidas necesarias para minimizar o evitar los efectos negativos producidos por el cierre de un puente.

En los Estados Unidos esta necesidad de minimizar los daños por socavación llevó a la (Federal Highway Administration, 1979) a desarrollar e implementar un procedimiento para diseñar e inspeccionar puentes considerando la socavación. El método desarrollado fue publicado en Hydraulic Engineering (Lagasse, 2001). *Este método recomienda la evaluación de la socavación para los periodos de retorno mayores de los que usualmente se usan para el diseño de un puente*, con el fin de considerar la vulnerabilidad o la ocurrencia de eventos no previstos.

En el caso de Colombia esta metodología consiste en las labores de inspección principal, inspección especial, estudios especializados, mantenimiento y rehabilitación, complementados con los módulos de (INVIAS, 2009). Esta metodología ha demostrado tener cierta utilidad a la hora de prevenir colapsos. Este trabajo de grado pretende complementar esta metodología mediante la priorización apoyado en un Sistema de Información Geográfica (SIG), el cual facilitara el proceso de priorización.

Este análisis de vulnerabilidad, amenaza y riesgo se hace con el fin de identificar los puntos débiles de la “comunidad”, de esta manera se logrará priorizar de forma efectiva los recursos destinados al mantenimiento de los puentes y a su rehabilitación.

Para la mayoría de los programas consultados se encontró que estaban constituidos por 4 etapas principalmente:

- Fase 1: Investigación en oficina y análisis de prioridades.
- Fase 2: Revisión de campo y análisis de la vulnerabilidad a la socavación.
- Fase 3: Evaluación detallada de la socavación.
- Fase 4: Plan de acción.



5.1 COMPONENTES DE LA METODOLOGÍA DE PRIORIZACIÓN

A continuación se presenta el organigrama de la metodología propuesta para la evaluación de la socavación en puentes véase Figura 5-1 junto con el desarrollo y pesos definidos para cada una de sus fases, a lo largo del capítulo se profundizará en las variables y temas a evaluar

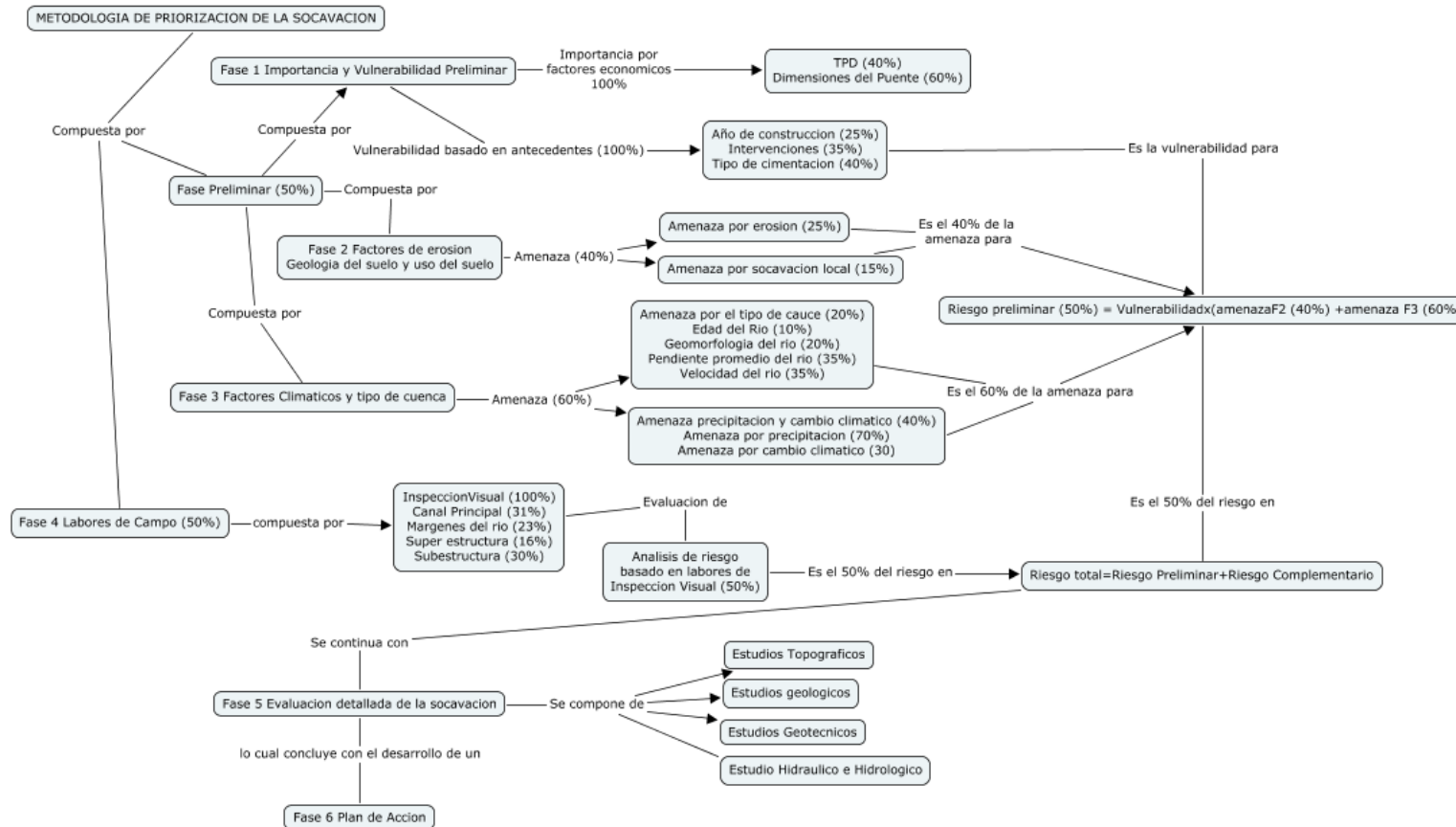


Figura 5-1 Flujo de la metodología para la evaluación de la Socavación en los puentes Fuente propia



Para el caso particular de este trabajo se desarrollará una metodología para aprovechar la funcionalidad del Sistema de Información Geográfica. Esta metodología está constituida por seis(6) fases que a su vez está dividido en una etapa preliminar de toma de decisiones comprendida por las 3 primeras fases y una etapa complementaria la cual está compuesta por la fase 4 que implica la inspección en campo de los puentes. Al dividir la metodología en más fases se buscó discretizar de mejor forma las fases tradicionales utilizadas en las metodologías convencionales. En este caso se optó por dividir la fase de investigación en oficina en tres etapas. Esto se hizo principalmente para darle mayor importancia a las diversas labores desarrolladas en esta fase preliminar ya que al estar apoyados en un SIG podemos aprovechar y obtener mejores resultados de análisis, cabe resaltar que la implementación en el SIG se refiere a la organización e ingreso de información así como la asignación de atributos y características requeridas en la metodología para poder realizar los posteriores análisis y calificaciones, el aplicativo computacional alimenta y es retroalimentado por el SIG con lo cual se puede llevar a cabo el proceso de priorización

Como se menciona anteriormente, en las 3 primeras fases es de gran importancia el uso del SIG, esto se debe en gran medida al hecho que para poder realizar un análisis de riesgo o susceptibilidad ante la socavación, se debe evaluar amenaza y vulnerabilidad véase (4.1 Socavación). Es allí donde el SIG desempeña un papel fundamental, esto se debe a que gracias a su sofisticación y a los mapas e información conseguida se pueden generar mapas tanto de amenaza como de vulnerabilidad y por ende de riesgo. Siguiendo este orden de ideas se han definido las funciones de cada una de las fases de la metodología como se muestra a continuación.

La fase 1 de Importancia y vulnerabilidad preliminar está dividida en 2 etapas, en la primera etapa se define la importancia del puente en base a sus factores físicos y económicos principalmente. En la segunda etapa de la fase 1 se evalúa la vulnerabilidad de los puentes basados principalmente en sus antecedentes, esto se debe al hecho que esta etapa está asociada principalmente a los factores que indican que tan preparada se encuentra la estructura dándole importancia a su tipo de cimentación, registros y año de construcción del puente.

Conjuntamente en las fases 2 factores de erosión, geología del suelo y tipo de suelo y en la fase 3 Factores climáticos y tipo de cuenca, tenemos mapas de amenaza ante la socavación. En la fase 2 encontramos las amenazas que están ligadas principalmente a factores geológicos y geotécnicos para esta fase se ha definido un peso del 40% de la amenaza, mientras que en la fase 3 encontramos los factores que están ligados principalmente al tema climático e hidráulico que comprenden el 60%, esto debido a que se pretende darle importancia a las variables dinámicas y la incidencia de las crisis invernales ha demostrado tener una influencia directa en la amenaza. De la combinación de las tres primeras fases obtenemos una calificación por riesgo preliminar.



Finalmente en la fase 4 Labores de campo se realiza un análisis de amenaza y vulnerabilidad. Al estar combinadas amenaza y riesgo se obtiene un análisis de riesgo basado en labores de inspección visual de campo. Como se mencionó anteriormente del resultado de la combinación de las primeras 3 fases obtendremos una calificación preliminar de riesgo equivalente al 50% de la puntuación total que será complementada por la inspección visual considerada como el 50% de la calificación total obteniendo así una puntuación definitiva de los puentes.

5.2 Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo

Con el fin de darle un mejor enfoque y aprovechar de mejor manera las capacidades de los sistemas de información geográfica SIG, se ha decidido plantear en este trabajo la evaluación de la susceptibilidad de la socavación de los puentes basados en un análisis de riesgo donde es necesario evaluar su amenaza y vulnerabilidad.

Para el caso particular de esta tesis la población serán los puentes analizados, la amenaza será definida por factores climáticos y geológicos principalmente. Para nuestro caso de análisis la comunidad son los puentes de la vía Bogotá-Villavicencio. Es calve resaltar que una de las principales razones por las cuales se subdividió en tres fases preliminares es que sin importar que las amenazas provengan de orígenes diversos, influyen en el mismo evento el cual es la socavación. La vulnerabilidad en este caso apunta principalmente a analizar cómo se encuentran los puentes preparados frente al riesgo de socavación.

En esta etapa también es importante definir una escala de análisis, como en este caso la escala es de nivel regional se utilizó una escala de análisis 1:100.000 para las curvas de nivel y definición de las cuencas, sin embargo es importante resaltar que para el análisis geológico se contaban con mapas a escala 1:250.000 para Cundinamarca y 1:500000 para el Meta.

A continuación se presenta el esquema general de la metodología con sus distintas fases y etapas la cual se basa en el organigrama presentado en la Figura 5-1:

- **Fase 1** Investigación en oficina, análisis de prioridades y vulnerabilidad e implementación en el SIG
- **Fase 2:** Análisis de amenaza geológica geotécnica general y local del puente e ingreso de información en SIG
- **Fase 3:** Análisis de amenaza por crisis invernal , factores Hidráulicos y análisis a través del SIG
- **Fase 4:** Revisión de campo y análisis de la vulnerabilidad a la socavación e ingreso de datos al SIG
- **Fase 5:** Evaluación de la socavación.
- **Fase 6:** Plan de acción.

ETAPA PRELIMINAR (50%)

- **Fase 1 Importancia y vulnerabilidad preliminar:**
 - Determinación de la importancia del puente basados en factores económicos
 - Tránsito Promedio Diario (TPD) según el INVIAS (40%)
 - Dimensiones del puente determinado por:
 - número de carriles y ancho del tablero (20%)
 - el número de luces (10%)
 - longitud total (30%)
 - Análisis de vulnerabilidad etapa preliminar basado en antecedentes e implementación en el SIG:
 - Año de Construcción (25%)
 - Intervenciones (35%)
 - Tipo de Cimentación (40%):
 - Estribos (15%)
 - Pilas (25%)
- **Fase 2 Factores de erosión, geología y tipo de suelo (40%):**
 - Análisis de amenaza por erosión y uso del suelo (25%):
 - Erosión a lo largo de la cuenca (100%)
 - Análisis de amenaza por geología de la cuenca (15%):
 - Tipo de suelo de cimentación (100%)
- **Fase 3 Factores climáticos y tipo de cuenca (60%):**
 - Análisis de amenaza por tipo de cauce (20%)
 - Edad del río (10%)
 - Geomorfología del río (20%)
 - Pendiente promedio del río (35%)
 - Velocidad del río (35%)
 - Análisis de amenaza por precipitación y emergencia invernal (40%)
 - Precipitación (40%)
 - Localizado en zona de emergencia invernal (60%)
 - **Análisis de Riesgo preliminar:**
 - De la combinación de las primeras fases se obtiene un riesgo preliminar que corresponde al 50% de la calificación total



ETAPA COMPLEMENTARIA (50%)

- **Fase 4 Labores de campo:**
 - Canal principal o cauce del río (32%)
 - Márgenes del río (21%)
 - Súper estructura (17%)
 - Subestructura o infraestructura (30%)

- **Fase 5:** Evaluación detallada de la socavación.
- **Fase 6:** Plan de acción.

Las fases 5 y 6 no son abarcadas debido al alcance del trabajo.

5.3 FASE 1 IMPORTANCIA Y VULNERABILIDAD PRELIMINAR

La fase 1 de la metodología consiste en la investigación y la obtención de todos los datos que se encuentren a disposición de las entidades pertinentes tales como planos de los puentes, parámetros de diseño y tipología del mismo, esto permite realizar una valoración rápida. Esta primera etapa estará dividida en dos fases, la primera consiste en hacer un análisis de la importancia del puente basado en sus factores económicos, a los cuales se han definido como:

- Tránsito Promedio Diario (TPD) según el INVIAS
- Tipo de vía en la que se encuentra el puente
- Dimensiones del puente determinado por:
 - el número de luces y su longitud total
 - número de carriles y ancho de la calzadas

Finalmente esta valoración servirá para determinar si un puente es de importancia alta media o baja según sus características físicas principalmente. Cabe resaltar que la asignación de estos pesos será dada por una tabla de rangos.

Como segunda fase de la etapa 1, se realizará un análisis más detallado de la vulnerabilidad ante la socavación, la cual dependerá de los siguientes factores:

- Tipología del puente
- Año de Construcción del puente
- Registros históricos
- Tipo de cimentación

De esta primera fase se podrá dar una a clasificación de los puentes según su importancia y según su riesgo ante la socavación:

- Puente de importancia (alta, media, baja) con muy baja vulnerabilidad por socavación.
- Puente de importancia (alta, media, baja) con baja vulnerabilidad por socavación.



- Puente de importancia (alta, media, baja) con vulnerabilidad media por socavación.
- Puente de importancia (alta, media, baja) con alta vulnerabilidad ante socavación.
- Puente de importancia (alta, media, baja) con vulnerabilidad muy alta ante socavación.

5.3.1 Implementación en SIG fase 1

5.3.1.1 Fase 1 - Etapa 1 Análisis de importancia basada en factores económicos del puente

Para la implementación de la fase 1 en el SIG se deben tener en cuenta los siguientes pesos y consideraciones, como podemos apreciar se analizan las características físicas del puente, las cuales están ligadas directamente con el costo que se podría generar por su interrupción o el colapso. Adicionalmente se tienen en cuenta de forma indirecta las posibles pérdidas monetarias que están relacionadas con la interrupción del flujo vehicular.

- Tránsito Promedio Diario (TPD) según el INVIAS 40%
- Dimensiones del puente determinado por:
 - número de carriles y ancho del tablero 20%
 - el número de luces 10%
 - longitud total 30%

Con el fin de determinar la importancia del puente según sus características físicas y económicas se debe realizar un análisis del TPD y del tipo de vía sobre la cual se encuentra el puente. Se definió un peso del 40% para el TPD e importancia de la vía, a continuación se presenta una tabla de las distribuciones de las categorías de las vías en base a sus TPDs según el INVIAS:

Tabla 5-1 Categorización de las vías (INVIAS)

Categoría	TPDs	Peso %
To	0 a 200	5%
T1	201 a 500	10%
T2	501 a 1000	15%
T3	1001 a 2500	20%
T4	2501 a 5000	25%
T5	5001 a 10000	30%
T6	Más de 10000	40%



Adicionalmente se determinan los pesos para las dimensiones del puente, según el ancho del tablero como se muestra en la Tabla 5-2, según la longitud total del puente como se muestra en la Tabla 5-4 y según el número de luces como se muestra en la Tabla 5-3.

Tabla 5-2 Peso según ancho del tablero (Propio)

ANCHO TABLERO	PESO
3.24 a 8.00	6%
8.01 a 9.00	9%
9.01 a 10.00	12%
10.01 a 11.00	15%
Mayor a 11.00	20%

Tabla 5-3 Peso según número de luces (Propio)

NUMERO DE LUCES	PESO
1 a 3	3%
4 a 8	6%
Más de 9	10%

Tabla 5-4 Peso según longitud total del puente (propio)

LONGITUD TOTAL	PESO
3 a 12.75	7%
12.76 a 17.20	13%
17.21 a 28.20	20%
28.21 a 60.10	25%
Más de 60.11	30%

En esta primera fase se determina la importancia del puente según sus características económicas más importantes, dimensiones y cantidad de vehículos transportados. De esta etapa se define la importancia del puente según la puntuación obtenida.

Tabla 5-5 Clasificación de importancia según calificación (Propio)

IMPORTANCIA	RANGO
Alta	70 - 100%
Media	40 - 69%
Baja	>40%



5.3.1.2 Fase 1 – Etapa 2 Análisis de vulnerabilidad ante la socavación basado en antecedentes

Para la etapa 2 de la fase 1, se tendrá en cuenta factores que ayudarán a determinar la vulnerabilidad ante la socavación. Encontramos factores como la tipología del puente, el año de construcción, registros históricos por colapsos o rehabilitación por socavación y el tipo de cimentación del puente. Para esta etapa se definieron los siguientes pesos:

- Año de Construcción (25%)
- Intervenciones (35%)
- Tipo de Cimentación (40%):
 - Estribos (15%)
 - Pilas (25%)

Se determinó que uno de los factores más relevantes en la evaluación de la susceptibilidad preliminar ante la socavación es el año de construcción, se detectó que hay una gran falta de información acerca de las fechas de construcción de los puentes, sin embargo se averiguó que en la mayoría de los casos con fechas desconocidas son puentes que fueron construidos antes de los años 70 por este motivo se tomó en cuenta también el hecho que se desconozca la fecha de construcción.

Tabla 5-6 Peso según año de construcción (Propio)

AÑO DE CONSTRUCCIÓN	PESO
1926-1945	25%
1946-1965	20%
1966-1985	15%
1985-2007	7%
<2007	5%
Desconocido	15%

Otro factor relevante en la evaluación de la vulnerabilidad ante la socavación es si se cuentan con registros históricos de rehabilitación por socavación en los puentes, sin embargo también se tendrá en cuenta si el puente ha sido rehabilitado anteriormente por alguna otra razón ya que podría estar indicando que el puente sufre de algún tipo de patología en particular y esto incrementaría el riesgo de colapso en caso tal que se llegue a presentar socavación.

**Tabla 5-7 Pesos por registros históricos (Propio)**

REGISTROS HISTÓRICOS (SEGÚN TIPO DE OBRA)	PESOS	CONVERSIONES
Rehabilitaciones por Socavación	35%	REHAB.S
Rehabilitación por otros factores	20%	REHAB.O
Desconocido	15%	D
Sin intervenciones	0%	SIN.I

El factor más importante es el tipo de cimentación presente en el puente, este factor es relevante a la hora de hablar de la socavación ya que cuando se presenta este fenómeno, estas estructuras dependen en gran medida de este factor. Sin embargo es difícil determinar qué tipo de cimentación está presente en un puente si no se cuenta con los planos, por esta razón se maneja un alto grado de incertidumbre. Adicionalmente se tendrá en cuenta si el puente tiene una o más luces, es decir si cuenta con pilas atravesadas en el cauce o si por el contrario está apoyada únicamente en los estribos. Esta consideración parte del hecho que la socavación es más intensa en los puentes que cuentan con pilas ya que interfieren de manera más directa con el cauce del río.

Tabla 5-8 Pesos por tipo de cimentación en pilas (Propio)

TIPO DE CIMENTACIÓN PILAS	PESOS
Cimentación Profunda	5%
Cimentación Superficial	25%
Desconocida	20%

Tabla 5-9 Pesos por tipo de cimentación estribos (Propio)

TIPO DE CIMENTACIÓN ESTRIBOS	PESOS
Cimentación Profunda	5%
Cimentación Superficial	15%
Desconocida	10%

De esta etapa podemos obtener un análisis de vulnerabilidad del puente en base a sus características físicas, es decir una calificación de que tan bien diseñado se encuentran los puentes frente a los procesos de socavación.

Tabla 5-10 Tabla de vulnerabilidad ante la socavación (Propia)

CALIFICACION	RANGO
Vulnerabilidad muy baja	0-20%
Vulnerabilidad baja	21-40%
Vulnerabilidad media	41-60%
Vulnerabilidad alta	61-80%
Vulnerabilidad muy alta	81-100%



5.4 FASE 2 FACTORES DE EROSION, GEOLOGIA Y TIPO DE SUELO (35%)

La fase 2 de la metodología de priorización consiste en el análisis detallado de la amenaza por la geología local y general del puente. Este análisis se realizara basándose en los registros de perforación y registros que se tengan con relación a este tema.

Adicionalmente se hará un análisis de la geología a una mayor escala. Para este propósito se obtuvieron los mapas de las geologías generales de los departamentos de Cundinamarca escala 1:250000 y el del departamento del Meta a escala 1:300000 del INGEOMINAS. Con esta información se pretende realizar un análisis de la producción general de sedimentos a lo largo de las diversas cuencas de los puentes.

Para realizar este análisis se tendrán en cuenta:

- Erosión a lo largo de la cuenca.

Estos análisis serán realizados principalmente aguas arriba de la localización del puente ya que el transporte de sedimentos que afectan localmente por agradación o degradación local del puente se ve afectado en gran medida por el transporte de estos sedimentos. Por esta razón se cuenta con mapas de geología general y erosión de los suelos en Colombia los cuales serán analizados conjuntamente en el SIG.

Con base en los registros de oficina disponibles sobre el suelo de cimentación se puede obtener un resultado del potencial de socavación local, los materiales de cimentación se han dividido en cuatro grandes grupos:

- Materiales cohesivos
- Materiales no-cohesivos
- Roca
- Desconocido



5.4.1 Implementación en SIG Fase 2

5.4.1.1 Pesos para la evaluación de la amenaza por erosión, uso de suelo y geología de la cuenca en SIG (40%)

En la implementación del SIG de la fase 2 se realizaron distintos análisis y se definieron los pesos. Un factor que se debe tener muy presente es el uso del suelo y la influencia antrópica en la cuenca ya que el ser humano tiene un gran impacto en las zonas donde se encuentra y modifica drásticamente sus entornos. Dependiendo del uso de los suelos en la cuenca se presenta una mayor o menor erosión, esto implica un cambio en los regímenes de transporte de partículas lo cual desestabiliza el cauce del río incrementando la socavación. De igual manera se plantea un análisis con base en la erosión en las distintas áreas como se muestra en la Tabla 5-11 Pesos según erosión de los suelos (Propio) En esta etapa de análisis se tendrá en consideración únicamente la erosión a lo largo de la cuenca:

- Erosión a lo largo de la cuenca (25%)

El factor analizado es la erosión a lo largo de la cuenca. Este factor es de gran importancia ya que nos brinda una idea de cómo serán los procesos de agradación y degradación del cauce. Se ha definido un factor de área, el cual es la relación entre el área bajo un tipo de erosión y el área total de la cuenca. Finalmente se debe multiplicar el peso asignado a cada uno de los materiales por su factor de área y así se tendrá una suma para obtener la puntuación total como se muestra en la Tabla 5-11 Pesos según erosión de los suelos (Propio).

Es de gran importancia tener en consideración toda la cuenca y no únicamente la ubicación precisa del puente, de esta manera se está teniendo en cuenta la socavación general y el hecho que al tener una fuerte erosión a lo largo de la cuenca se incrementa la socavación debido a la alteración de los regímenes naturales de agradación y degradación del río

Tabla 5-11 Pesos según erosión de los suelos (Propio)

EROSION DEL SUELO	% AREA	PESOS	% TOTAL
Muy severa	-	100%	
Severa	-	80%	
Moderada	-	60%	
Baja	-	30%	
Sin erosión	-	5%	
No apreciable	-	0%	
		SUMA	



En esta etapa se puede analizar el comportamiento de los regímenes de producción y transporte de sedimentos en el cauce, por esta razón se plantea una calificación de amenaza por la agradación y degradación producida por el río en una cuenca en particular. A continuación se presenta la tabla de calificación para esta fase:

Tabla 5-12 Calificación de la amenaza por agradación y degradación del cauce (Propio)

CALIFICACIÓN	RANGO
Amenaza muy baja por erosión	0-20%
Amenaza baja por erosión	21-40%
Amenaza media por erosión	41-60%
Amenaza alta por erosión	61-80%
Amenaza muy alta por erosión	81-100%

5.4.1.2 Pesos para la determinación de la amenaza por geología de la cuenca en SIG (15%)

Para el análisis de la socavación local se tendrán en cuenta los registros de perforación clasificación de los suelos que se tengan a disposición como se muestra en la Tabla 5-13 a continuación

Tabla 5-13 Peso según tipo de suelo en la cimentación (Propio)

TIPO DE SUELO		PESO
Suelo Cohesivo		40%
Suelo No-cohesivo	Bien gradado	60%
	Pobrementemente gradado	100%
Roca		15%
Desconocido		55%

Sin embargo debido a la dificultad para conseguir estos registros locales se ha planteado una alternativa adicional, como se muestra en la Tabla 5-14 donde el peso por el tipo del suelo fue asignado en parámetros de las distintas formaciones geológicas como lo son la era, el sistema y la serie. Cabe aclarar que los pesos fueron asignados en base a los siguientes supuestos:

- Generalmente los materiales depositados recientemente presentan mayor erosionabilidad que los materiales antiguos (Guevara, 1998).
- Muchas arcillas dispersivas son de origen aluvial. Algunas arcillas de las laderas de lechos de río son también dispersivas. (Márquez, Et al. 2009)



- Los suelos derivados de la intemperización de las rocas ígneas y metamórficas son casi todos no dispersivos, pero pueden ser erosionables. (Márquez, Et al. 2009)
- Texturas limosas, poco estructurados, con bajos contenidos en materia orgánica, baja permeabilidad, sin piedras ni gravas y con la superficie del terreno lisa. (Departamento de Edafología y Química Agrícola, 1998)

Adicionalmente se ha definido un peso para cada uno de los materiales definidos anteriormente, cabe aclarar que en la fase 5 se realizarían estudios puntuales del suelo de cimentación del puente, determinando sus características e incidencia en la socavación:

Tabla 5-14 Peso según tipo de material de cimentación

ERA	SISTEMA	SERIE	ROCAS TIPO	PESO		
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO		Aluviales-Coluviales	100%	
		PLEISTOCENO	SUP.	Gravas, arenas y limos Loess y turba Terraza fluviales y marinas Playas levantadas	100%	
			MED.		93%	
			INF.		90%	
	TERCIARIO	NEOGENO	PLIOCENO		Depositos fluviales (gravas cuarcitas empastadas en matriz arcillosa)	83%
						73%
			MIOCENO	SUP.	Calizas de los paramos	63%
				MED.	Margas y yesos Arcillas	33%
				INF.	Margas, Areniscas	67%
						67%
		PALEOGENO	OLIGOCENO		Conglomerados calcareos, areniscas, yesos	33%
						40%
			EOCENO	SUP.	Areniscas y yesos	57%
				MED.	Calizas y margas	63%
				INF.	Flysch: alternancias de calizas/margas	50%
						53%
PALEOCENO		Areniscas	53%			
	Calizas	67%				
MESOZOICO	CRETACICO	SUP.	SENOSENSE		27%	
				Conglomerados Brechas calcareas	43%	
				Margas Calizas	33%	
				60%		
		INF.	NEOCOMIENSE	Calizas y dolomias masivas Calcarenitas	50%	
					40%	
				Acrosas Arenas siliceas	17%	
	Calizas	33%				
		57%				



	JURASICO	SUP.	MALM	Conglomerados, arenas silíceas, areniscas y arcillas	27%	
				Calizas areniscas y arcillas	17%	
		MED.	DOGGER	Calizas masivas y rimitas	50%	
				Margas	33%	
				Calizas y margas	33%	
		INF.	LIAS	Calizas masivas	40%	
				Calizas y margas	40%	
		TRIASICO	SUPERIOR		Calizas y dolomias tableadas	50%
					Calizas y dolomias oquerosas (Carniolas)	50%
					Arcillas abigarradas y yesos	40%
MEDIO			Calizas, dolomias y margas	43%		
INFERIOR			Areniscas (cuarcitas, rodensos)	27%		
			Arcillas rojas	33%		
PALEOZOICO	PERMICO	SUPERIOR	Conglomerados de base	23%		
			Areniscas	20%		
	INFERIOR		Series detríticas con interacciones de roca volcánica	17%		
				17%		
	CARBONIFERO	SUPERIOR	Moladas	13%		
			Granitos	30%		
	DEVONICO	INFERIOR	Calizas	10%		
			Pizarras y areniscas	10%		
				10%		
	SILURICO	SUPERIOR	Calizas y dolomias nudosas	23%		
			Areniscas rojas	23%		
	ORDOVICICO	INFERIOR	Granitos	10%		
				10%		
	CAMBRICO	SUPERIOR	Pizarra (con graptolites)	7%		
			Calizas	10%		
				10%		
	PRECAMBRICO	PROTEROZOICO	VENDIENSE	Pizarras y cuarcitas	10%	
Granitos				13%		
Cuarcita armoricana				13%		
ARCAICO			Cuarcita y pizarras	10%		
			Dolomias y marmoles	10%		
				10%		
	PROTEROZOICO	VENDIENSE	Grauvacas y gneises	10%		
			Formaciones porfiroides	7%		
				3%		
				3%		



De este análisis obtenemos la siguiente calificación:

Tabla 5-15 Análisis de amenaza por geología de la cuenca (propio)

CALIFICACIÓN	RANGO
Amenaza muy baja por geología de la cuenca	0-20%
Amenaza baja por geología de la cuenca	21-40%
Amenaza media por geología de la cuenca	41-60%
Amenaza alta por geología de la cuenca	61-80%
Amenaza muy alta por geología de la cuenca	81-100%

5.5 FASE 3 FACTORES CLIMATICOS Y TIPO DE LA CUENCA (60%)

Uno de los factores principales que se quiere analizar en esta tesis son los cambios climáticos y como las anomalías climáticas generan un incremento en la socavación. Para este propósito se cuenta con mapas de clima y de emergencia invernal obtenidos del IGAC y el IDEAM.

Característica a ser consideradas de los ríos:

- Edad del río
- Geomorfología del río
- Pendiente promedio del río
- Localizado en zona de emergencia invernal

5.5.1 Análisis de fase 3 amenaza por tipo de cauce, precipitación e implementación en SIG

Para analizar los factores hidráulicos y la incidencia de la crisis invernal en la socavación de los puentes se determinaron los siguientes pesos:

Características de la cuenca **(20%)**

- Edad del río (10%)
- Geomorfología del río (20%)
- Tipo de cauce (35%)
- Velocidad de la corriente (35%)

En esta etapa se analizaran las características físicas del río y con base en estos resultados obtendremos un puntaje para el análisis hidráulico general. Se tuvieron en cuenta factores como la edad del río su geomorfología, su pendiente promedio y velocidad, adicionalmente se evaluará el riesgo de amenaza invernal en base a los registros con los que se cuenta.



Características de la cuenca (20%):

En la Tabla 5-16 a continuación se presenta el peso según la edad del río.

Tabla 5-16 Pesos según edad del río (Propia)

EDAD DEL RIO	PESO
Niños	5%
Joven	10%
Maduro	8%
Viejo	3%

A continuación se presenta la tabla de pesos según geomorfología del río seguida por la tabla de pesos según tipo de cauce.

Tabla 5-17 Pesos según morfología del río (Propio)

GEOMORFOLOGÍA	PESO
Semirecto	20%
Trenzados	15%
Meándrico	10%

Tabla 5-18 Pesos según pendiente del río (Propio)

TIPO DE CAUCE	PESO
Alta Montaña (pendiente de más del 20%)	35%
Media Montaña (pendiente del 10-20%)	25%
Falda de Montaña (pendiente del 5-10%)	15%
Planicie río caudaloso (pendiente del 0-5%)	10%

Tabla 5-19 Pesos según la velocidad de la corriente (Propio)

VELOCIDAD MEDIA (M/S)	PESO
Menor a 1	5%
1 a 2	10%
2 a 3	20%
3 a 4	30%
Mayor a 4	35%
Desconocido	15%



Precipitación y zonas de emergencia invernal (60%)

- Precipitación (70%)
- Localizado en zona de emergencia invernal (30%)

En este punto obtenemos una calificación de la amenaza generada por el río y sus características de la cual tenemos la siguiente tabla.

Tabla 5-20 Tabla de amenaza generada por el río ante la socavación (Propia)

CALIFICACIÓN	RANGO
Amenaza muy baja en la cuenca	0-20%
Amenaza baja en la cuenca	21-40%
Amenaza media en la cuenca	41-60%
Amenaza alta en la cuenca	61-80%
Amenaza muy alta en la cuenca	81-100%

Precipitación y emergencia invernal (40%):

Tabla 5-21 Pesos por registros históricos amenaza invernal (Propio)

LOCALIZACIÓN POR AMENAZA INVERNAL	PESO
Se encuentra localizado en zona de emergencia	30%
No se encuentra localizado en zona de emergencia	0%

Con el fin de realizar el análisis de precipitación se cuenta con mapas de clima de precipitación diaria promedio que se obtuvieron en el IDEAM.

Tabla 5-22 Pesos por registros de precipitación (Propio)

PRECIPITACION DIARIA PROMEDIO (mm)	PESO
>60.1	70%
40.1 a 60	60%
20.1 a 40	50%
10.1 a 20	40%
5.1 a 10	30%
1.1 a 5	20%
0.1 a 1.1	10%
0	0%

En esta fase se obtendrá un mapa de amenaza por clima el cual depende de las precipitaciones diarias promedio registradas en los mapas suministrados por el IDEAM, es importante que las intensidades promedio sean las mayores con el ánimo de realizar un estudio bajo las condiciones críticas para la socavación

**Tabla 5-23 Amenaza por precipitación (Propia)**

CALIFICACIÓN	RANGO
Amenaza muy baja por precipitación	0-20%
Amenaza baja por precipitación	21-40%
Amenaza media por precipitación	41-60%
Amenaza alta por precipitación	61-80%
Amenaza muy alta por precipitación	81-100%

Finalmente para obtener una puntuación del puente, se debe realizar una combinación de todos los factores con el fin de obtener un resultado del riesgo ante la socavación. Cabe aclarar que a la hora de determinar los pesos se tuvo en cuenta cuales de los factores analizados tiene menos incertidumbre.

Del análisis de la fase 1 etapa 1, se obtiene la importancia del puente. A continuación se presentarán los pesos para definir el riesgo del puente.

- Fase 1 – Etapa 2 vulnerabilidad preliminar basada en los antecedentes
- Fase 2 – Análisis factores de erosión y geología (40%)
- Fase 3 – Factores climáticos y tipo de cuenca (60%)

De estas primeras 3 etapas se obtiene una puntuación preliminar del riesgo, en la fase 1 como se dijo anteriormente se evalúa la vulnerabilidad mientras que en la fase 2 y 3 se evalúan las amenazas.

Riesgo fase preliminar= Vulnerabilidad (Fase 1)x(Amenaza (fase 2 40%)+Amenaza (fase 3 60%))

Finalmente se obtiene una calificación del riesgo preliminar comprendido por las 3 primeras etapas ante la socavación en el puente como se muestra a continuación en la tabla 5-24

Tabla 5-24 Riesgo ante la socavación (Propio)

RIESGO PRELIMINAR	PORCENTAJE
Muy Bajo	0-20%
Bajo	21-40%
Medio	41-60%
Alto	61-80%
Muy alto	81-100%



5.6 FASE 4 LABORES DE CAMPO (50%)

La fase 4 consiste en la inspección visual, esta se realiza con el objetivo de complementar las tres primeras fases de la metodología y de esta forma poder validar la metodología en la carretera seleccionada (Vía Bogotá-Villavicencio). Esta fase tendrá un valor del 50% del análisis del riesgo en los puentes, esta fase es considerada la fase complementaria de la inspección preliminar comprendida por las 3 primeras etapas.

Esta fase está dividida en los siguientes ítems a los cuales se les asignaron unos pesos en relación a la cantidad de preguntas y la importancia de cada una de ellas:

- Canal principal o cauce del puente 31%
- Márgenes del río 23%
- Superestructura 16%
- Subestructura o infraestructura 30%

Con el fin de llevar a cabo esta inspección se desarrolló una metodología de inspección visual, la cual está compuesta por diversos criterios que deben ser tenidos en cuenta a la hora de realizar la salida de campo. En primer lugar se presenta un listado de equipos y herramientas que deben ser llevados a la hora de realizar la salida, adicionalmente se presenta el formato de cómo hacer la inspección y los parámetros más relevantes a ser tenidos en consideración.

5.6.1 Equipos o Herramientas

Para efectuar las inspecciones, se requieren los siguientes equipos y/o herramientas:

- a. Dotación Básica
 - chaleco
 - Botas
 - Gafas
- b. Herramientas para identificación visual
 - Binoculares
 - Metro
 - Espejo
- c. Herramientas para documentación
 - cámara fotográfica
 - libreta de campo
 - cámara de video
- d. Herramientas de acceso
 - Escalera
 - Soga
 - Arnés
 - Polea



- chaleco salvavidas
- e. Equipo de señalización
 - conos de plástico
 - cinta
 - triángulos
- f. herramientas varias
 - botiquín
 - radio GPS
 - linterna

5.6.2 Consideraciones de seguridad en la inspección

El equipo de inspección de puentes debe entender y practicar las precauciones de seguridad durante la realización de la inspección de puentes. Las señales de advertencia deben ponerse en los accesos al puente para alertar a los vehículos de la actividad en el puente. Esto es particularmente importante si las mediciones son tomadas desde el tablero del puente, ya que la mayoría de los puentes tienen separaciones mínimas entre la vía y la baranda, los inspectores deben usar chalecos reflectivos para que sean visibles a los automovilistas.

Cuando las mediciones se realizan en el afluente, el inspector debe estar asegurado con una cuerda de seguridad y debe estar apoyado por equipo en el río en caso de requerirlo. Ya que siempre en los cauces existe la posibilidad de creciente súbita del flujo de agua.

El equipo de inspección, debe dejar el itinerario con respecto a su programa de trabajo para el día. El equipo también debe llevar como mínimo un teléfono celular para que puedan obtener ayuda inmediata en caso de una emergencia. (Lagasse, 2001)

5.6.3 Análisis de riesgo ante la socavación obtenido por la visita de campo

En esta etapa los puentes que fueron identificados en las fases anteriores con potencial de socavación, principalmente aquellos que fueron identificados con calificaciones de 1 hasta 3 en la fase 1 deben ser inspeccionados con el fin de complementar la información que se posee. Esta revisión es principalmente un estudio global de los problemas de socavación, así como un análisis de la geomorfología fluvial de los ríos. (Richardson E. A., Et al. 1999)

Se hace énfasis en conocer si la cimentación del puente es superficial o profunda, en dado caso que se desconozca al puente se le dará una puntuación debido a la incertidumbre. Finalmente los puentes que tengan riesgos de socavaciones considerables deben pasar a inspecciones más específicas.



5.6.4 Formato y guía de Registro en la inspección

Basados en (Richardson E. A., Et al. 2000) Durante la inspección de puentes, la condición del afluente, subestructura, la protección del canal, y las medidas de control de erosión debe ser evaluada, junto con la condición del río.

La metodología de inspección general de un puente según la (Lagasse, 2001) posee 116 componentes a ser analizados en cada puente. Sólo la mitad de los artículos son "calificaciones de condición " que podrían cambiar de un control a otro, seis de ellos están relacionados con problemas de inestabilidad hidráulica y socavación / corriente

5.6.4.1 Canal y flujo

Este ítem registra las condiciones físicas asociadas con el flujo de agua a través del puente , tales como la estabilidad de corriente , la condición de la canal ,condición de los accesos , protección de taludes , o dispositivos de control de flujo , incluyendo diques, drenajes y obras hidráulicas aledañas. El inspector debe estar particularmente atento a signos de velocidad excesiva de agua que pueden generar debilitamiento de los cimientos, la erosión de los bancos, y la realineación de la corriente que puede dar lugar a problemas inmediatos o potenciales (Richardson E. A., Et al. 1999). La acumulación escombros en la superestructura y subestructura debe ser registrada mediante fotografías

5.6.4.2 Márgenes del río (adecuación del canal)

Este ítem registra la apertura de canal con respecto al flujo a través del puente, registrando intervenciones realizadas para generar un flujo más adecuado a través del puente o controlar algunos problemas de inestabilidad que se hayan presentado como evidencias de erosión en las laderas del canal o lugares aledaños al puente. (Richardson E. A., Et al. 1999)

5.6.4.3 Superestructura

Este ítem registra la condición física de las vigas y tablero del puente. En este caso se analiza si la superestructura presenta signos evidentes de inundaciones relacionados directamente con el dimensionamiento de esta. Adicionalmente se comprueba si la superestructura se encuentra en condiciones de resistir una emergencia en la cual se vea involucrada su integridad ante la socavación. (Richardson E. A., Et al. 2000)

5.6.4.4 Subestructura

Este ítem registra la condición física de los pilares, pilotes, estribos, apoyos, u otros componentes de soporte. Todos los elementos de la subestructura deben



ser inspeccionados en busca de signos visibles de desgaste como evidencia de agrietamiento, pérdida sección, desalineación, erosión, y signos de inundación por encima de los niveles usuales, dichos aspectos deberán ser guardados como registro fotográfico de la inspección (Richardson E. A., Et al. 2000)



Para el desarrollo de la tesis se tomó como punto base la metodología de inspección visual encontrada en (Muñoz E. , 2012). Como complemento de la metodología se adoptó un sistema de validación por pesos y puntajes.


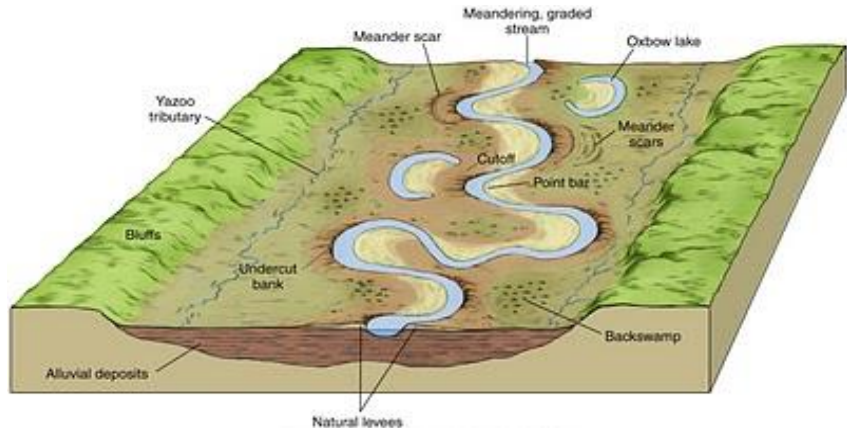
La metodología tiene las siguientes características, en primer lugar se debe resaltar que las preguntas tienen solo tres respuestas posibles. En el caso que la respuesta sea afirmativa (si) se le dará un valor a dicho ítem de 2, en el caso que la respuesta sea negativa (no) se le dará un valor de 0 al ítem, finalmente si la respuesta es desconocida (d) debido al grado de incertidumbre se le dará una calificación de 1 al ítem.

5.6.5 Definiciones y terminología de formato de campo

Como complemento de la metodología de inspección visual, se presenta a continuación una guía explicativa de cada uno de los ítems que se desarrollados en el formato de campo véase Tabla 5-25 , como ayuda adicional se han buscado imágenes referentes a cada tema con el fin de ilustrar de forma más clara lo que se analiza en cada pregunta:

Tabla 5-25 Terminología de formato de campo

1	<p>Hay evidencia de la degradación en el cauce del río?</p>  <p>Foto 5-1 degradación en el cauce Fuente: (New Zealand Transport Agency, 2009)</p>
	<p>Según (Guevara, 1998) la degradación de un cauce se refiere a la pérdida de material en una zona del río y es el producto del desequilibrio entre el aporte sólido que trae el agua a una cierta sección y la mayor cantidad de material que es removido por el agua de esa sección (véase 4.1.3.1 Socavación a largo plazo o degradación)</p>
2	<p>¿Hay confluencia con otras corrientes aguas arriba o aguas abajo del puente?</p>  <p>Foto 5-2 Confluencia con otras corrientes Fuente: (Guevara, 1998)</p> <p>En hidrología la confluencia: es la unión de dos o más corrientes, glaciares, o flujos marinos, así como el punto donde ocurre, esta condición genera aporte de material de arrastre así como de flujo en el canal. (Guevara, 1998) (4.1.3.4.1 Socavación general por otras causas)</p>

<p>3</p>	<p>¿Hay evidencia de que la corriente este arrastrando grandes cantidades de sedimentos o escombros?</p>  <p>Foto 5-3 Arrastre de grandes cantidades de sedimentos o escombros Fuente: (Aguas de Mérida, 2011)</p>
<p>Proceso que se presenta si el nivel del lecho del río se eleva o si las márgenes se desplazan hacia el interior del cauce y ocurre cuando hay excesos de sedimentos que la corriente no puede arrastrar, generalmente genera cambios en las líneas del flujo y en época de lluvias genera contracciones espontaneas de la corriente (Guevara, 1998) véase (4.1.8.2 Escala de sección del flujo)</p>	
<p>4</p>	<p>¿Hay evidencia de un aumento del flujo del rio en las llanuras de inundación adyacentes?</p>  <p>Foto 5-4 Llanuras de inundación Fuente: (Christopherson, Et al. 2010)</p>
<p>Llanura de inundación, o valle de inundación, es se compone por las zonas bajas, aluviales y casi planas a lo largo de un cauce, que están sujetas a inundación durante crecientes, particularmente esta condición se da en zonas de terreno planas (Melville, Et al. 2001)</p>	

¿Hay operaciones mieras de grava o arena activas en el canal cerca del puente?

5



Foto 5-5 operaciones mieras de grava o arena activas en el canal Fuente: (PEÑA, 2012)

Según (Melville, Et al. 2001) las operaciones mineras en el canal, aportan una cantidad poco común de escombros y pueden según la escala llegar a cambiar la morfología del canal y modificar su cauce

¿Hay un ángulo significativo de ataque del flujo del canal en la(s) pilas o estribo del puente?

6

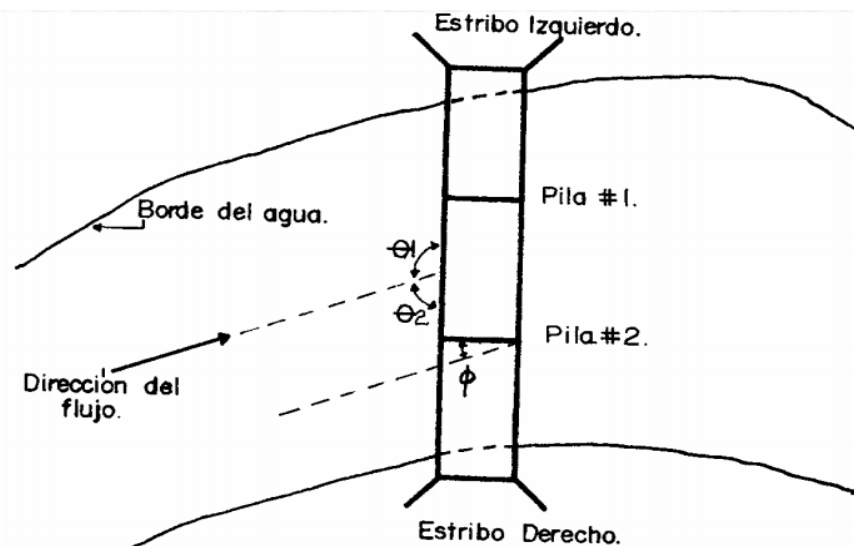


Foto 5-6 ángulo significativo de ataque del flujo del canal en la(s) pilas o estribo del puente Fuente: (Guevara, 1998)

El Angulo de las líneas de flujo de la corriente es significativo , véase (4.1.6.3 Angulo de ataque del flujo)

¿Hay presencia de islas, desechos o material de arrastre que puedan afectar el flujo del canal?

7

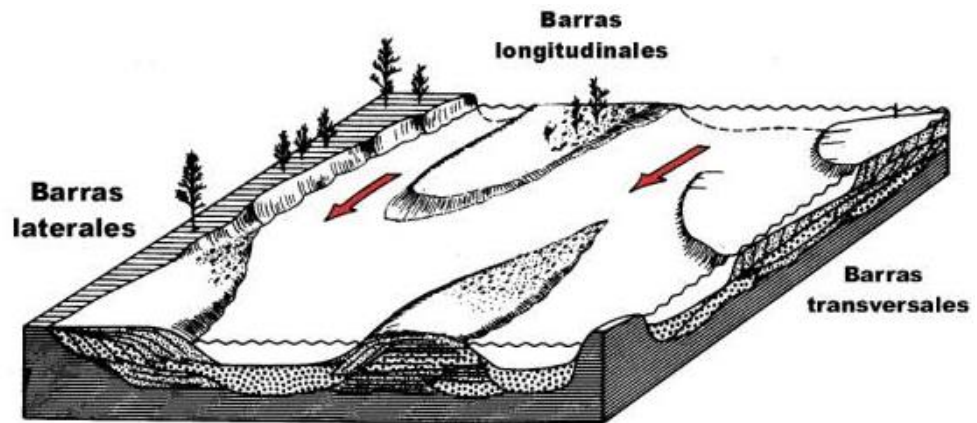


Foto 5-7 presencia de islas o barras que puedan afectar el flujo del canal Fuente: (Grijalva, Et al. 2012)

Se presentan depósitos de materiales que se forman dentro de los ríos y que permanecen con vegetación. Son visibles para caudales medios o normales y dividen el flujo de una corriente. Algunas islas se originan por crecimiento de vegetación en una barra, por depósito de sedimentos aluviales o por la confluencia de corrientes tributarias véase (4.1.3.4 Socavación general por contracción)

¿Existe vegetación acumulada cerca de pilas, producto de diferentes crecientes?



8

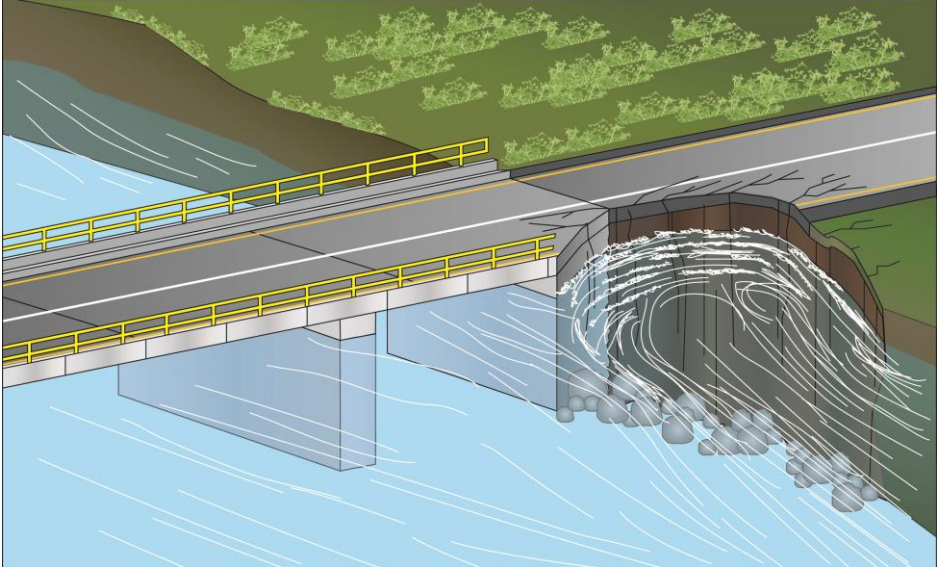





Foto 5-8 vegetación acumulada cerca de pilas Fuente: (Guevara, 1998)

Se presenta una notable obstrucción de vegetación en las pilas del puente, se puede presentar este tipo de obstrucción a partir de avalanchas o deslizamientos que recientemente hallan ocurrido en el cauce del canal, véase (4.1.6.10 Material Flotante)

9	<p>¿Existe evidencia inundaciones en las márgenes del río?</p>  <p>Foto 5-9 inundaciones en las márgenes del río Fuente: (Diario de Navarra, 2010)</p> <p>Existe evidencia de un evento de inundación en el cual se observan lodo, escombros o materiales arrastrados por el río fuera de las márgenes del canal descrito en (Suárez, 2001)</p>
10	<p>Los patrones de flujo sobrepasan el cauce y retornan al canal principal?</p>  <p>Foto 5-10 patrones de flujo sobrepasan el cauce Fuente: (Diario Pueblos America, 2010)</p> <p>Los patrones de flujo en inundaciones, salen del cauce principal y posteriormente regresan, son indicadores del efecto de banca llena en un canal, aquella descarga cuando el nivel del agua en la sección se desborda hacia la planicie de inundación activa, la que se define como una zona plana adyacente al río e inundada con una frecuencia descrito por (Wolman, Et al. 1957).</p>



<p>11</p>	<p>Existe adecuación Hidráulica en buen estado en las márgenes del canal?</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Foto 5-11 Adecuación Hidráulica (Bolsacretos) en las márgenes del canal Fuente: (Muñoz E. , 2012)</p>
<p>Adecuaciones hidráulicas en las márgenes del canal de tipo gaviones, bolsacreto, dados de concreto o algún tipo de obra preventiva en las márgenes, véase (4.1.10 Obras de rehabilitación)</p>	
<p>12</p>	<p>¿La vía está construida sobre un terraplén que invade parte de la planicie natural de inundación?</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Foto 5-12 la planicie natural de inundación, Fuente: (Daily Mail Reporter, 2013)</p>
<p>Zona de inundación: zonas bajas, aluviales y casi planas a lo largo de un cauce, que están sujetas a inundación durante crecientes descritas por (Maza, Et al. 1967).</p>	

<p>13</p>	<p>¿Hay evidencia de desbordamientos en las vías de acceso (erosión de taludes del terraplén)?</p>  <p>Foto 5-13 erosión de taludes del terraplén Fuente: (Muñoz E. , 2012)</p> <p>En la zona de los terraplenes de acceso al puente ,hay presencia de vegetación arrasada, escombros, material de arrastre o erosión , producto de los patrones y dirección del flujo véase (4.1.13.2 Erodabilidad de los materiales)</p>
<p>14</p>	<p>¿La superestructura posee topes sísmicos para evitar el desplazamiento durante las inundaciones?</p>  <p>Foto 5-14 topes sísmicos para evitar el desplazamiento durante las inundaciones Fuente: (ICOPZA, 2012)</p> <p>Los apoyos del puente consideran topes o encajonamientos que evitan el desplazamiento horizontal de la superestructura descrito por (Melville, Et al. 2001)</p>

15	<p>¿Tiende la superestructura a recoger desechos o presentar una gran resistencia al flujo?</p>  <p>Foto 5-15 superestructura recoge desechos o presentar una gran resistencia al flujo Fuente: (Diario El Comercio, 2012)</p> <p>La conformación de la superestructura del puente genera acumulación de desechos que quedan atrapados a su paso, esta situación provoca una obstrucción en el flujo que genera un aumento de velocidad y puede generar un fenómeno de socavación localizada véase (4.1.3.4 Socavación general por contracción)</p>
16	<p>Comprobar si hay marcas de agua o cicatrices en elementos de la superestructura</p>  <p>Foto 5-16 marcas de agua o cicatrices en elementos de la superestructura Fuente: (Propia, 2013)</p> <p>Las rocas suelen conservar marcas o niveles de inundaciones. Estas líneas pueden ser marcadas por los sedimentos o el liqen. Las marcas generalmente son rastros de crecientes más frecuentes, así el caudal de banca llena puede corresponder a la marca más alta como se menciona en (Guevara, 1998)</p>

17	<p>¿La superestructura del puente presenta algún desprendimiento o grieta importante producida por la socavación de las pilas o estribos?</p>
	 <p>Foto 5-17 Grietas o desprendimientos en la superestructura del puente Fuente: (Diario Sin Futuro, 2011)</p>
	<p>Presencia de grietas de considerable tamaño en la superestructura de orientación discontinua y que no comprendan figuraciones por causa del proceso constructivo como se hace referencia en (Melville, Et al. 2001)</p>
18	<p>¿Existe evidencia de sobrepaso del puente por el flujo del canal?</p>
	 <p>Foto 5-18 sobrepaso del puente por el flujo del canal Fuente: (Diario El Nuevo Dia, 2012)</p>
	<p>Se manifiesta por cicatrices y deformaciones en la parte superior del tablero que siguieren que el flujo del canal sobrepaso el puente explicado por (Melville, Et al. 2001)</p>

<p>19</p>	<p>La superestructura del puente se encuentra en zona de inundación?</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Foto 5-19 superestructura del puente se encuentra en zona de inundación Fuente: (Diario Pueblos America, 2010)</p>
<p>Se verifica si la ubicación y zona de inundación generaría que la superestructura del puente quedara sumergido como se hace referencia en (Wolman, Et al. 1957)</p>	
<p>20</p>	<p>¿Presenta el tablero del puente signos de deflexión o deformación?</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Foto 5-20 El puente presenta signos de deflexión o deformación en la superestructura Fuente: (Javier Malaga, 2007)</p>
<p>Se buscan signos de deformación en los elementos rectos del puente como son las barandas o andenes y desplazamientos en las juntas, tal y como se menciona en (Melville, Et al. 2001)</p>	

21	<p>¿Hay evidencia de socavación en las pilas o estribos?</p>  <p>Foto 5-21 Socavación en las pilas o estribos Fuente: (Muñoz E. , 2012)</p> <p>La erosión o socavación en la zona de cimentación de la las pilas del puente es notable y visible fácilmente véase (4.1.4 Socavación local en pilas)</p>
22	<p>¿Alguna de las pilas o estribos se encuentra inclinado, rotado o deformado?</p>  <p>Foto 5-22 Pilas del puente inclinadas Fuente: (Guevara, 1998)</p> <p>Indicios de desplazamiento o rotación de las pilas del puente, ocasionado por la pérdida del material de soporte en la cimentación de la pila o el estribo mencionado en (Kattell, Et al. 1998)</p>

¿Hay acumulación de residuos en aletas, pilas y/o estribos?

23



**Foto 5-23 acumulación de residuos en aletas, pilas y/o estribos
Fuente: (Noticias Álava, 2013)**

La geometría de los estribos generaron la acumulación de residuos en la zona aledaña véase (4.1.6.10 Material Flotante)



¿Existen obras de protección hidráulica en buen estado, cerca de las pilas, estribos?


24



Foto 5-24 Obras de protección hidráulica en la subestructura del puente Fuente: (Muñoz E. , 2012)

Existen obras o intervenciones en la sub estructura del puente como enrocados, bolsacretos u otros, véase (4.1.10 Obras de rehabilitación)

25	¿Existe movimiento transversal en los apoyos?
	 <p>Foto 5-25 movimiento transversal en los apoyos Fuente: (Guevara, 1998)</p>
	Se observa un desplazamiento transversal de los apoyos del puente que lo alejan de su condición original véase (4.1.5 Socavación local en estribos)
26	Existen grietas en pilas o estribos?
	 <p>Foto 5-26 grietas en pilas o estribos Fuente: (Muñoz E. V., Et al. 2004)</p>
	Existen grietas de considerable proporción diferentes a las producidas por el proceso constructivo, pueden ser evidencia de asentamientos producidos por modificaciones en el material de soporte en la cimentación del puente, fenómeno mencionado en (Missouri Water Science Center, 2013)

27	<p>¿Existe asentamiento detectado en las barandas o elementos lineales de la subestructura y superestructura?</p>
	<div style="text-align: center;">  </div> <p>Foto 5-27 Asentamiento detectado en elementos lineales del puente Fuente: (Diario Prensa Libre, 2011)</p> <p>Se observa en perspectiva frontal las barandas y elementos horizontales del puente para determinar si poseen deflexiones o deformaciones en su recorrido, referenciado de (Melville, Et al. 2001)</p>

Del análisis obtenido de la etapa de inspección visual se darán las siguientes calificaciones como se muestra en la tabla a continuación.

Tabla 5-26 Riesgo complementario ante la socavación (Propio)

RIESGO COMPLEMENTARIO	PORCENTAJE
Muy Bajo	0-20%
Bajo	21-40%
Medio	41-60%
Alto	61-80%
Muy alto	81-100%



Finalmente se obtendrá una puntuación para cada puente de riesgo contra importancia, como se muestra en la Tabla 5-27 en donde los puentes con importancias más altas y riesgos más altos obtienen las puntuaciones más altas (5), sin embargo podemos notar que a pesar de la importancia del puente siempre que se obtengan calificaciones altas de riesgo tenemos como resultados puntuaciones altas

Tabla 5-27 Evaluación general del riesgo ante la socavación. Adaptado de: (Melville, Et al. 2001)

		Importancia del Puente		
		IA	IM	IB
Riesgo del Puente ante la Socavación	R-MA	5	5	5
	R-A	5	4	4
	R-M	4	3	3
	R-B	2	2	1
	R-MB	1	1	1
	N/A	1		

1. Calificaciones según importancia y vulnerabilidad: 5=muy alta, 1=baja susceptibilidad.

2. N/A no aplica, esto quiere decir que el puente no se encuentra sobre un flujo de agua, o es un puente cerrado o que este puente será reemplazado.

5.7 FASE 5 EVALUACIÓN DETALLADA DE LA SOCAVACIÓN.

Los puentes que sean definidos como de importancia media y alta y aquellos que tengan riesgos de socavación alta requerirán una evaluación detallada de la socavación, por motivos de alcance de este trabajo de grado, no se realiza una evaluación detallada, mas sin embargo se mencionan los criterios y factores que deben tomarse en cuenta obtenidos de (Muñoz E. , 2012)

Se sugiere emplear las recomendaciones de la metodología HEC 18 (Richardson E. A., Et al. 1999) la cual indica que esta evaluación debe ser completada por un equipo interdisciplinario de ingenieros hidráulicos geotecnia y estructurales. Normalmente la evaluación incluye una revisión detallada del sitio de los cálculos estimados y una evaluación estructural de la cimentación con el fin de estimar las condiciones actuales del puente y el diseño que cualquier contramedida necesaria (Muñoz E. , 2012)

Con relación esta etapa no existe metodología unificada para la evaluación detallada de los socavación que permita a los diseñadores y constructores estimar con la seguridad la profundidad de la socavación en puentes .esta carencia se debe a la complejidad del problema y a su misma variación durante



el corto plazo en el cual se produce la degradación, donde los flujos son inestables y las características dinámicas y geométricas son complejas.

Se han desarrollado numerosas fórmulas empíricas o experimentales a nivel mundial para predecir su valor tanto en suelos granulares como en suelos cohesivos, Prácticamente la mayoría de las ecuaciones comúnmente usadas por la ingeniería para el cálculo de la socavación son resultado de investigaciones de laboratorio con poca verificación en el campo (Muñoz E. , 2012)

Los valores estimados con estas fórmulas varían ampliamente ya que la extrema complejidad del fenómeno hace que los estudios experimentales consideren como constantes ciertos aspectos del problema (Muñoz E. , 2012). Además de los patrones y tipos de cauce para la evaluación detallada de la socavación es importante tener en conocimiento los siguientes aspectos

- **Velocidad crítica** es un valor crucial de la hidráulica fluvial y se denomina crítico porque corresponde al momento en el cual las partículas del lecho empiezan a moverse y hacer desprendidas por el flujo ya sea de manera individual o generalizada .si se trata del momento en que se inicia el movimiento de una partícula individual a esta velocidad crítica se le nomina velocidad umbral, si se refiere al instante en que se produce un movimiento generalizado de las partículas del lecho esta velocidad critica se denomina velocidad erosiva
- **Velocidad cortante y velocidad cortante critica:** depende de la pendiente , del gradiente de energía en el canal principal y profundidad promedio del mismo
- **Velocidad de caída de las partículas** es un parámetro que corresponde a la velocidad de laida de las partículas sólidas cuyo estudio tiene un valor teórico practico bastante trabajado actualmente
- **Influencia de las características de la corriente en el transporte de sedimentos:** Los factores que influyen en el movimiento de los sedimentos son : la pendiente longitudinal del flujo, el caudal líquido, la velocidad media del flujo, la distribución de la velocidad, las propiedades del líquido en movimiento , la fuerza de sustentación hidrodinámica y el estado de flujo
- **Propiedades de los sedimentos del lecho:** es el tamaño característicos del lecho del canal, que es una característica que se presenta en forma tácita en la mayoría de las metodologías derivadas de experimentos de laboratorio
- **Conceptos geomorfológicos del sistema fluvial**
- **Tipos de sustancias fluviales**
- **Configuración del lecho**
- **Estabilidad del cauce de los ríos**



Según (Muñoz E. , 2012) la ejecución de un estudio detallado de socavación, generalmente debe abarcar los temas de estudios topográficos, geológicos, hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos y estructurales, los cuales son mencionados a continuación referenciados de su libro (Ingeniería de Puentes Tomo II , 2012)

5.7.1 El estudio topográfico

Consiste en un levantamiento del sitio de ponedero, para determinar las curvas de nivel y los perfiles de la vía tomados por el eje y los extremos de la calzada, además se debe determinar al alineamiento de las márgenes del cauce arriba y abajo con los niveles de aguas observados

- Recopilación de toda la información existente
- Reconocimiento de campo
- Levantamiento topográfico
- Batimetría
- Plano general de localización con el eje del proyecto y la ubicación de los sondeos de suelos
- Planos planta y perfil que abarquen la zona de ubicación del ponedero
- Planos de planta y perfil de la batimetría realizada

5.7.2 El estudio geológico

Según (Muñoz E. , 2012) el estudio geológico o geomorfológico debe llevarse a cabo desde el detalle más general hasta el más específico, partiendo de un conocimiento regional del río y de las características geológicas del terreno, mediante la recopilación de información y visitas a campo con mapas y fotografías aéreas y estudios anteriores, se hace un análisis detallado de los accidentes geológicos para una evaluación de la estabilidad del cauce.

5.7.3 El estudio geotécnico

Según (Muñoz E. , 2012) el estudio geotécnico que se realiza mediante una investigación y exploración del subsuelo de fundación donde se obtienen los parámetros geo mecánicos necesarios para establecer el tipo de cimentación y garantizar la estabilidad desde el punto de vista de resistencia y compresibilidad, Según el (CCDSP, 1995) en el capítulo A.6 sección A.6.3, se recomienda un programa de exploración de campo y ensayos de laboratorio que los ingenieros deben cumplir en el desarrollo de este estudio especializado En forma resumida las etapas de este estudio son las siguientes

a) Reconocimiento de campo y exploración esquemática

Inspección visual del sitio del ponedero para analizar los materiales, los márgenes y los posibles problemas en la fundación

**b) Realización de sondeos , perforaciones o apiques**

Se debe ejecutar, como mínimo, un sondeo par cada unidad de subestructura (pilas y estribos) y los registros de exploración necesarios

c) Ensayos de laboratorio

Se recomienda realizar los siguientes ensayos de laboratorio a las muestras que se recuperen, con el objeto de calificarlas y de determinar la capacidad portante de la cimentación

- Peso unitario
- Granulometría
- Humedades relativas
- Limites líquido y plástico
- Penetración estándar
- Resistencia al corte
- Compresión inconfiada
- Consolidación y corte directo

d) Determinación de tipos de fundación: mediante las características del suelo, la socavación probable, el efecto de sismo y las cargas que transmite la superestructura, se establece el tipo de cimentación mas adecuado para las pilas y estribos tales como: zapatas, pilotes , cajones etc.

5.7.4 Estudio hidráulico e hidrológico

Se tomó del libro (Muñoz E. , 2012) las siguientes etapas requeridas para realizar estudios hidráulicos e hidrológicos

- a) Recopilación de información:** inicialmente se recopila la información de la cuenca hidrográfica que incluya pendiente, tipo de suelo, tipos de cultivos, datos pluviométricos (caudales, precipitaciones, etc.), área de la cuenca, etc. En campo se propone realizar aforos en el sitio del ponteadero, para determinar la velocidad de la corriente y batimetría aguas arriba y abajo
- b) Estudio hidrológico** Consiste en la determinación del caudal de diseño para el análisis de socavación y la determinación de la geometría de la estructura del puente, incluye un análisis de la cuenca hidrográfica, de las precipitaciones del caudal máximo y del nivel de aguas máximas, para la calibración de la sección transversal en el ponteadero
- c) Estudios Hidráulicos:** mediante los aforos empleando sistemas como el molinete, los flotadores y la formula de Manning, se pueden determinar la velocidad media y el caudal en una sección, además esta parte incluye:



- Determinación de líneas de corriente
- Determinación de sedimentos
- Efecto de la reducción de sección hidráulica
- Alineamiento de las pilas dentro del cauce
- Recomendación de obras de protección del cauce

Mediante el análisis de la socavación local y global para un periodo de retorno de 100 años, se determinaron los siguientes parámetros del sitio de ponedero

- Caudal de diseño, área hidráulica y longitud del puente
- Niveles mínimos, medios y máximos de las aguas del cauce
- Recomendaciones sobre el galibo
- Recomendaciones de protección de las márgenes
- Profundidad máxima esperada de socavación local y general
- Zonas de inundación

Los parámetros que se deben tener en cuenta para las estimaciones la profundidad de socavación en puentes, son los siguientes

1. Calculo del caudal de diseño para las condiciones más severas. Normalmente se adopta un tiempo de retorno de 100 años o el caudal de desbordamiento de la estructura
2. determinación de los perfiles de la selección transversal inicial del ponedero y del nivel de aguas extraordinarias, es recomendable tener la curva de calibración de la sección transversal del rio
3. Calculo de la socavación total para las peores condiciones, aplicando las ecuaciones de socavación por contracción o total y de socavación local
4. Dibujo del perfil de socavación total en una sección transversal del sitio donde tendrá fundación el puente
5. Valoración de los resultados obtenidos y evaluación de su conformidad, teniendo en cuenta las limitaciones y capacidades de los métodos utilizados
6. Evaluar el tipo , tamaño y localización del puente
7. Completar el análisis para el diseño de la cimentación del puente, de acuerdo con las especificaciones estándar definidas
8. 'para obras importantes de recomienda repetir el procedimiento pero para el caudal de diseño de un evento con un periodo de retorno de 500 años



5.8 FASE 6 PLAN DE ACCIÓN. (POA)

Según (Muñoz E. , 2012) el paso final después de la evaluación del proceso, es desarrollar un plan de acción para un puente determinado con el propósito de corregir los problemas de socavación, el plan de acción es la herramienta que cierra el círculo de la evaluación y el estudio de un puente, primero se reconoce el problema en oficina y por último se aplican las medidas correctivas en campo, el plan de acción puede ser provisional o de carácter permanente, se tienen en cuenta los planes de vigilancia y/o inspección después de la inundación y los procedimientos para el cierre de los puentes, en caso de ser necesario. En este paso se pueden emplear la obras de mantenimiento o rehabilitación que se presentan en (4.1.9 Monitoreo e instrumentación de la socavación) y (4.1.10 Obras de rehabilitación)

5.8.1 Desarrollo y estructuración de planes de acción

Basado en (Kattell, Et al. 1998) el desarrollo de un plan de acción está directamente relacionado con las condiciones particulares de cada puente identificado con riesgo de falla por socavación. En este trabajo de tesis no se abarca en gran medida el desarrollo de planes de acción, mas sin embargo son mencionadas las características propias que se deben desarrollar en el plan de acción.

Los planes de acción, son los planes creado a partir de condiciones particulares de la hidrología, la hidráulica del canal, la estructura del puente, y las condiciones geológicas y geotécnicas de la zona, para mitigar, reparar o controlar. Según el plan de acción ((POA) U.S. Department of Transportation, 2006) se establecen tres componentes principales

5.8.1.1 Orientación y reglamentación

Proporciona entre otros detalles, una orientación amplia sobre la gestión y estrategias de inspección, y los componentes de una plantilla estándar de POA (plan de acción)

5.8.1.2 Estudio fluvial del cauce

Presenta un estudio fluvial con el fin de definir las condiciones en las cuales se debe fundamentar el plan de acción y descartar soluciones poco aplicables

5.8.1.3 Planillas de estandarización

Presentan una guía detallada para complementar el plan de acción, con la componente del estudio fluvial del cauce, que permite organizar la información



y permite discernir la solución adecuada e incluso su replanteo, a continuación se resumen los componentes de una planilla estándar

5.8.1.4 Información General

Esta sección proporciona información básica sobre el puente (número de identificación, la ruta, el nombre del cauce atravesado, año de construcción, TPD, etc.)

5.8.1.5 La responsabilidad del plan de Acción

Autor POA, agencia responsable y la información de contacto personal.

5.8.1.6 Vulnerabilidad

Calificación actual del puente, descripción del recorrido de inspección, la evaluación y el resumen del historial de socavación.

5.8.1.7 Acción recomendada (s)

Estado de las medidas de mitigación o control actuales ej. Frecuencia de la inspecciones, dispositivos de monitoreo, programa de vigilancia de inundaciones, las contramedidas adoptadas.

5.8.1.8 NBIS Codificación Información

Resumen de calificaciones históricas en términos de socavación en caso de existir

5.8.1.9 Programa de Monitoreo

Recorridos y procedimientos de monitoreo, incluyendo alertas y / o condiciones críticas y las acciones necesarias si se producen esas condiciones.

5.8.1.10 Contramedidas – Recomendaciones

Lista priorizada de contramedida alternativas, estimaciones de costos, calendario previsto para la instalación y la información de contacto personal.

5.8.1.11 Plan de Cierre del puente

Condiciones que requieren cierre del puente, información de contacto personal, y las condiciones en las que el puente puede ser reabierto al público.

5.8.1.12 Ruta de Desvío

Descripción de la ruta de desvío, la identificación de otros puentes en la ruta de desvío, equipos de control de tráfico y de localización (señales, barreras), y las instrucciones para notificar a otras agencias y medios de comunicación públicos.

5.8.1.13 Adjuntos

Apoyo a los datos e información, incluyendo mapas, fotografías, bocetos, planos de construcción, cálculos de socavación, diseños preliminares contramedidas, etc.



5.8.2 Sostenibilidad de los planes de acción

Una vez que el POA inicial de un puente se ha desarrollado, debe ser actualizado tanto en forma periódica y como se justifica por los cambios en el puente o vía (por ejemplo, cambios de canal o puente erosión debido a una inundación, la instalación de las contramedidas, etc.) Sección 2 de la plantilla POA identifica a la persona contacto de la agencia responsable de la POA, así como la frecuencia prevista de actualizaciones periódicas. ((POA) U.S. Department of Transportation, 2006)

En general, las actualizaciones periódicas serán normalmente de carácter administrativo, por ejemplo, revisar el calendario de aplicación de contramedidas, o cambiar la información. Las inspecciones llevadas a cabo durante o después de un evento de inundación serían típicamente la actividad que pone de manifiesto la necesidad de una actualización POA inmediata basada en una condición observada. ((POA) U.S. Department of Transportation, 2006)

Otros elementos de mantenimiento periódico POA son:

- Preparación: La preparación involucra una combinación integrada de planificación, capacitación, ejercicios, cualificación del personal y las normas de certificación, la adquisición y modernización de equipos y publicaciones. El POA debe incluir información actualizada para reflejar los cambios en la disponibilidad de recursos, equipo de comunicaciones y protocolos, la estructura de gestión, etc.
- Tecnologías de apoyo: Los avances en la tecnología pueden ser eliminados en los POA, por ejemplo, en los programas de vigilancia del puente, o sistemas de comunicación y de intercambio de datos. En la medida en que los puntos y otros organismos asociados con un POA incorporan estos avances, el POA debe actualizarse para reflejar la nueva tecnología



6 ANÁLISIS Y VALIDACIÓN

Para la validación la metodología anteriormente expuesta se realizaron dos visitas técnicas en los puentes de la vía Bogotá Villavicencio, que fue autorizada por la concesión de coviandes, se realizaron registros fotográficos y de video, así como la recopilación de las calificaciones que fueron obtenidas en las inspecciones.

6.1 Resultados de inspección visual de un puente

A continuación se presenta los resultados de la inspección visual del puente los gaviones que hace parte de los 52 puentes que se encuentran en la vía Bogotá Villavicencio adicionalmente se presenta las imágenes de la inspección visual, cabe resaltar que en anexo se adjuntan los otros listados de las inspecciones realizadas de puentes junto con sus imágenes, a continuación de presenta en la Tabla 6-1 ,Tabla 6-2 ,Tabla 6-3 el cuestionario de inspección visual del puente los gaviones a manera de ejemplo:

Tabla 6-1 Ejemplo de inspección de un puente

REVISIÓN PRELIMINAR DEL PUENTE		N=No; D=Desconocido; S=Si
Autoridad responsable del Puente: COVIANDES		
VIA: Santafé de Bogotá - Villavicencio	Posicion de la Via: 23+0005	
Nombre del Puente: Puente Guamo (los gaviones)		
Puente sin flujo de agua:	N D S	
Puente cerrado:	N D S	
Puente programado para ser reemplazado:	N D S	
Si alguna de las respuestas anteriormente enunciadas es "S", entonces ir directamente al final del documento		
Nombre del cauce atravesado:		
Año de construcción del puente:	DESCONOCIDO	
Socavación histórica en el puente:	N D S	
Socavación histórica en el canal:	N D S	
Socavación histórica en los puentes cercanos:	N D S	
Registros de emergencia reciente	N D S	
REVISIÓN DE LA IMPORTANCIA DEL PUENTE (I)		
Volumen de tráfico (tpd)	3560	
Rutas alternativas; ya listas o puentes temporales:	N D S	
Transporte de productos agrícolas	N D S	
Transporte de productos manufacturados	N D S	
Transporte de de productos minerales	N D S	
Transporte pecuario	N D S	
Redes transportadas (identificar: e.j. energía,telefono,gas,alcantarillado, suministro de	N D S	



Tabla 6-2 Ejemplo de formato de campo para Inspección Visual 1

CANAL PRINCIPAL O CAUCE DEL PUENTE

Si=2, Desconocido (D)=1, No=0

	CRITERIO	VAL.	IMP.	CALIF.	OBSERVACIONES
1	Hay evidencia de la degradación en el cauce del río?	0	3	0	No se observan cambios en la profundidad del lecho del río
2	¿Hay confluencia con otras corrientes aguas arriba o aguas abajo del puente?	0	2	0	A partir de las condiciones hidromorfológicas de la zona se determino no hay confluencia de corrientes aguas
3	¿Hay evidencia de que la corriente este arrastrando grandes cantidades de sedimentos o escombros?	0	3	0	no se observaron cambios en la morfología del cauce ni arrastre de materiales ni escombros
4	¿Hay evidencia de una aumento del flujo del río en las llanuras de inundación adyacentes?	2	3	6	En la inspección se observaron evidencias de inundación en las zonas aledañas al cauce que
5	¿Hay operaciones mieras de grava o arena activas en el canal cerca del puente?	0	2	0	No existen operaciones mineras en la zona
6	¿Hay un ángulo significativo de ataque del flujo del canal en la(s) pilas o estribo del puente?	0	3	0	El Angulo de ataque del flujo respecto a la sub estructura del puente es bajo o nulo
7	¿Hay presencia de islas, desechos o material de arrastre que puedan afectar el flujo de el canal?	0	3	0	No se percibieron cambios significativos en el flujo por causa de la presencia de desechos o material de
8	¿Existe vegetación acumulada cerca de pilas, producto de diferentes crecientes?	0	2	0	no se observo acumulación de vegetación en las pilas del puente
				Vulnerabilidad de Socavación	5%

MARGENES DEL RIO

Si=2, Desconocido (D)=1, No=0

	CRITERIO	VAL.	IMP.	CALIF.	OBSERVACIONES
9	¿Existe evidencia inundaciones en las márgenes del río?	2	3	6	Existe evidencia de materiales de arrastre o vegetación en las márgenes del canal lo que indica un evento de
10	¿Los patrones del flujo de inundación, sobrepasan la dirección del flujo y/o retornan al canal principal?	0	3	0	no se observo ningún flujo que saliera del canal principal
11	¿Las margenes poseen adecuacion hidraulica u obras de proteccion?	2	2	4	no se observaron intervenciones en las márgenes del canal
12	¿la vía esta construida sobre un terraplén que invade parte de la planicie natural de inundación?	0	3	0	El puente no se encuentra en la zona de inundación
13	¿Hay evidencia de desbordamientos en las vías de acceso (erosión de taludes del terraplén)?	0	3	0	no existe evidencia de desbordamientos
				Vulnerabilidad de Socavación	8%

Ejemplo:

Se llena la casilla de valoración con
> 2 = si 1 = Desconocido 0 = No

La valoración se multiplica con la Importancia
> VAL x IMP. = CALIF

Obteniéndose la calificación por cada ítem

La vulnerabilidad por capitulo se obtiene a partir de un promedio ponderado de las calificaciones con su respectivo peso (IMP.)



Tabla 6-3 Ejemplo de formato de campo para Inspección Visual 2

SUPERESTRUCTURA		Si=2, Desconocido (D)=1, No=0			
CRITERIO	VAL.	IMP.	CALIF.	OBSERVACIONES	
14 ¿La superestructura posee topes sísmicos para evitar el desplazamiento durante las inundaciones?	2	1	2	El sistema de apoyos del puente posee topes que evitan que la superestructura sufra de desplazamientos	
15 ¿Tiende la superestructura a recoger desechos o presentar una gran resistencia al flujo?	0	2	0	la superestructura esta conformada de tal forma que no recoge desechos	
16 Comprobar si hay marcas de agua o cicatrices en elementos de la superestructura	0	1	0	en la inspección no se observo ningún tipo de marca de agua o cicatriz en la superestructura	
17 ¿La superestructura del puente presenta algún desprendimiento o grieta importante?	0	2	0	no se identificaron fisuras de considerable tamaño	
18 ¿Existe evidencia de sobrepaso del puente por el flujo del canal?	0	2	0	no hay evidencia de que el flujo halla sobrepasado el tablero del puente	
19 Comprobar si la superestructura se encuentra sobre la llanura de inundación	0	1	0	la superestructura del puente no se encuentra en riesgo de inundación	
20 ¿Presenta el tablero del puente signos de deflexión o deformación?	0	2	0	el puente no presenta signos de deformación	
Vulnerabilidad de Socavación				2%	

SUBESTRUCTURA O INFRAESTRUCTURA		Si=2, Desconocido (D)=1, No=0			
CRITERIO	VAL.	IMP.	CALIF.	OBSERVACIONES	
21 ¿Hay evidencia de socavación en las pilas o estribos?	0	3	0	no se observa con claridad indicios de socavación el las pilas del puente	
22 ¿Alguna de las pilas o estribos se encuentra inclinado, rotado o deformado?	0	3	0	no se observo desplazamiento ni rotación en las pilas	
23 ¿Hay acumulación de residuos en aletas, pilas y/o estribos?	0	3	0	no se observaron acumulación de residuos en los estribos del puente	
24 ¿Existen obras de protección hidráulica en buen estado, cerca de las pilas, estribos?	2	2	4	se observaron obras de protección el la sub estructura del puente	
25 ¿Existe movimiento transversal en los apoyos?	0	3	0	no se observo ningún desplazamiento transversal de los apoyos del puente	
26 Existen grietas en las pilas o los estribos?	0	3	6	no se observaron ningún tipo de grietas de considerable proporción	
27 ¿Existe asentamiento detectado en las barandas o elementos lineales de la subestructura y superestructura?	2	3	6	se observo una notable deformación de las barandas y elementos horizontales	
Vulnerabilidad de Socavación				12%	

ANAL PRINCIPAL O (MARGENES DEL RIO)	SUPERESTRUCTURA	INFRAESTRUCTURA
5%	8%	2%
12%		

NUMERO	TIPO		
15	3	90	0.68
9	2	36	0.27
3	1	6	0.05
PUNTUACIÓN TOTAL		132	100%

PUNTUACIÓN		
ALTA	75%	100%
MEDIA	50%	75%
BAJA	0%	50%

VULNERABILIDAD TOTAL POR SOCAVACION	
PUNTUACIÓN	VULNERABILIDAD
26%	BAJA

A continuación se presenta un breve registro fotográfico del puente en cuestión, su evaluación incluyó el estudio de la geología local y las obras de mantenimiento realizadas :

En la Foto 6-1 se ve claramente que se han construido obras de mitigación contra la erosión, así mismo se alcanza a apreciar que la corriente lleva un caudal importante y que ha generado deslizamientos



Foto 6-1 Erosión en ladera del puente Los Gaviones

Del ejemplo anteriormente presentado podemos notar que cada ítem de la fase de inspección visual tiene un peso, este está dado por la puntuación máxima posible de la inspección dividida entre la puntuación máxima de cada ítem. Adicionalmente se puede apreciar que cada pregunta tiene una importancia de 1 a 3, esta importancia fue asignada a criterio de los autores del documento pero puede ser modificada a discreción del usuario si lo cree pertinente, adicionalmente en cada uno de las preguntas encontramos una explicación de la respuesta.

A continuación se muestra una imagen tomada bajo el tablero del puente Los Gaviones en el cual se aprecia la súper estructura, ver Foto 6-2



Foto 6-2 Foto de súper estructura puente los gaviones

En la Foto 6-2 podemos observar la superestructura del puente los gaviones, el protocolo de inspección posee 4 sub temas principales a evaluar, en el título de superestructura se buscan signos de asentamientos y deformaciones en el tablero del puente, generalmente se toman una serie de fotografías genéricas y se registran cualquier signo que pueda indicar condiciones irregulares en el puente.



Foto 6-3 Protección con gaviones y muros con anclajes

Al momento de realizar la inspección, se encontró que este puente había sido rehabilitado por socavación. En la Foto 6-3 se muestra como sus laderas de encuentran protegidas por muros en gaviones y muros anclados.



Fase1

Para la elaboración de los formularios del aplicativo computacional, se utilizó un algoritmo simple que consistió en la utilización de las tablas de asignación de los pesos a cada variable desarrollada anteriormente

Se presenta el uso del aplicativo computacional, como herramienta que facilite el ingreso de datos al SIG

Tabla 6-4 Fase 1 Aplicativo computacional Fuente: Propia

FASE 1 IMPORTANCIA			
Datos Generales			
Identificación del Puente	Los Gaviones		
Departamento	Cundinamarca		
# Identificación	12-4006-0006.00		
Nombre de la Via	bogota-Vilavicencio		
Punto de Referencia PR+	22+005		
Informacion de Oficina			
Año de Construccion	Desconocido	15%	25%
Transito Promedio DiarioTPD	2501 a 5000	25%	
Intervenciones	Rehabilitaciones por Socavación	35%	35%
Superestructura			
Ancho del Tablero	Mayor a 11.00	20%	
Numero de Luces	1 a 3	3%	
Longitud Total	28.21 a 60.10	25%	
Tipo de cimentacion			
Pilas	N/A	0%	25%
Estribos	Cimentación Profunda	5%	15%
Etapa 1 IMPORTANCIA		73%	ALTA
Etapa 2 VULNERABILIDAD		55%	Medio

En la primera fase etapa 1 se evaluó la importancia del puente, calificación que se le otorga al puente según sus características físicas como lo son la dimensión, longitud y TPD. En la misma fase pero en la etapa 2 se evalúa la vulnerabilidad del puente, es decir que tan bien se encuentra preparado el puente para afrontar las amenazas causadas por la socavación. De esta fase se obtuvo que el puente era de importancia alta y vulnerabilidad media.



Fase 2

Para la fase dos se contaron con dos sub temas a evaluar, el primero se refiere a la erosión de la cuenca dependiendo del uso de los suelos para lo cual se generó en ArcGIS el Mapa 6 Amenaza por erosión en la cuenca zona en la cual se encuentra la localización de los puentes evaluados bajo estos criterios y se relacionan con los usos de los suelos con la erosión elevada, se debe tener en cuenta que los procesos de erosión son complejos y no necesariamente incrementan la erosión en la localización de los puentes, sin embargo es una aproximación a los procesos de socavación que serán estudiados en la fase 5 . Para el análisis de la socavación local se utilizaron mapas de geología obtenidos del INGEOMINAS.

Tabla 6-5 Fase 2 Aplicativo computacional Fuente: Propia

Digitar el % de Area en la casilla definida				
EROSION DEL SUELO		% AREA	PESOS	% TOTAL
Muy severa		0%	100%	0%
Severa		94%	80%	75%
Moderada		5%	60%	3%
Baja		1%	30%	0%
Sin erosión		0%	5%	0%
No apreciable		0%	0%	0%
			SUMA	79%
CALIFICACIÓN		Amenaza alta por agradación y degradación del cauce		
		79%		
Estructura y edad de la cuenca				
CALIFICACIÓN				
		Susceptibilidad media ante socavación local		
		40%		

Fase 3

Así mismo la fase 3 se divide en dos etapas, en la primera etapa se evalúa la amenaza generada por el río que atraviesa el puente el cual depende de diversas características como los son la pendiente, la velocidad la geomorfología y la edad del cauce. Para realizar este análisis se generó el Mapa 8 Amenaza en el cual se pueden identificar estos parámetros. En esta etapa se evidenció que el río es de amenaza alta. En la siguiente etapa de la fase 3 se analizó la precipitación y la crisis invernal, para este análisis se contaba con mapas de clima recientes y el mapa de amenaza invernal y por inundaciones. Cabe aclarar que ningún puente de esta vía se vio afectado por



la amenaza invernal, para este análisis se generó el Mapa 9 Amenaza por precipitación del cual se obtuvo una calificación baja de estos parámetros.

Tabla 6-6 Fase 3 Aplicativo computacional Fuente: Propia

FASE 3-CARACTERISTICAS DEL RIO		
Datos ArcGIS		
EDAD DEL RIO	Niños	8%
GEOMORFOLOGÍA	Semirecto	20%
LOCALIZACIÓN POR AMENAZA INVERNAL	No se encuentra localizado en zona de emergencia	0%
PRECIPITACION (mm)	10.1 a 20	40%
Pendiente Promedio del Río	Media Montaña (pendiente del 10-20%)	25%
Datos		
VELOCIDAD MEDIA (M/S)	Desconocido	15%
CALIFICACIÓN		
	20% Características del río	68%
	40% Cambio climático y precipitación	40%
		Río de amenaza alta
		Amenaza baja por precipitación y cambio climático

Tabla 6-7 Amenaza preliminar Aplicativo computacional Fuente: Propia

AMENAZA PRELIMINAR	0.25				
	0.15				
EROSION DEL SUELO	20%	Amenaza alta por agradación y degradación del cauce			
Estructura y edad de la cuenca	6%	Susceptibilidad media ante socavación local			
Características del río	14%	Río de amenaza alta			
Cambio climático y precipitación	16%	Amenaza baja por precipitación y cambio climático			
Etapa 2 VULNERABILIDAD	55%	Medio			
RIESGO PRELIMINAR					
Riesgo fase preliminar= Vulnerabilidad(Fase 1)x(Amenaza (fase 2 40%)+Amenaza (fase 3 60%))					
	Bajo	30%			

Al finalizar la etapa 3 se obtuvo el riesgo preliminar, el cual es el resultado de realizar la siguiente operación matemática:

$$\text{Riesgo preliminar} = \text{Vulnerabilidad } F1 * (\text{Amenaza } F2 * 40\% + \text{Amenaza } F3 * 60\%)$$

Dónde:

F1=Fase 1 vulnerabilidad

F2=Fase 2 combinada



F3=Fase 3 combinada

En este caso se obtuvo un riesgo preliminar bajo, esto se debe en gran medida a los factores climáticos, esto se puede analizar en el Mapa 10 Análisis de Riesgo Preliminar por socavación

Fase 4

Tabla 6-8 Fase 4 Aplicativo computacional Fuente: Propia

Inspeccion Visual			
Digitar los valores obtenidos			
			RESULTADO
CANAL PRINCIPAL O CAUCE DEL PUENTE		32%	18%
MARGENES DEL RIO		21%	17%
SUPERESTRUCTURA		17%	8%
SUBESTRUCTURA O INFRAESTRUCTURA		30%	15%

En la fase 4 que corresponde a la inspección visual se analizan los distintos resultados obtenidos para cada uno de los elemento analizados, finalmente se obtiene un mapa de riesgo por inspección visual o complementario Mapa 11 Riesgo por inspección visual. En este caso se obtuvo un riesgo medio por inspección visual.

Finalmente se combinan los riesgos a los cuales se les han asignado un peso del 50% a cada uno. En ArcGIS se genera el Mapa 12 Riesgo total por socavación el cual es el resultado final de la combinación de todos los factores anteriormente evaluados. En este caso se obtuvo que el puente tenía un riesgo medio ante la socavación total.



Tabla 6-9 Riesgo Total Aplicativo computacional Fuente: Propia

Datos Generales				
Identificación del Puente	Los Gaviones			
Departamento	Cundinamarca			
# Identificación	12-4006-0006.00			
Nombre de la Vía	bogota-Vilavicencio			
Punto de Referencia PR+	22+005			
Información de Oficina				
Año de Construcción	Desconocido			
Tránsito Promedio DiarioTPD	2501 a 5000			
Intervenciones	Rehabilitaciones por Socavación			
Superestructura				
Ancho del Tablero	Mayor a 11.00			
Número de Luces	1 a 3			
Longitud Total	28.21 a 60.10			
Tipo de cimentación				
Pilas	N/A			
Estribos	Cimentación Profunda			
FASE 1				
Etapa 1 IMPORTANCIA		73%	ALTA	
Etapa 2 VULNERABILIDAD		55%	Medio	
FASE 2				
AMENAZA EROSION		20%	Amenaza alta por agradac	
AMENAZA SOCAVACION LOCAL		6%	Susceptibilidad media ant	
FASE 3				
AMENAZA CARACTERISTICAS DEL RIO		14%	Rio de amenaza alta	
AMENAZA CAMBIO CLIMATICO Y PRECIPITACION		16%	Amenaza baja por precipi	
RIESGO PRELIMINAR				
		30%	Bajo	
FASE 4				
CANAL PRINCIPAL O CAUCE DEL PUENTE		6%		
MARGENES DEL RIO		4%		
SUPERESTRUCTURA		1%		
SUBESTRUCTURA O INFRAESTRUCTURA		5%		
		15%		
RIESGO TOTAL				
		23%		



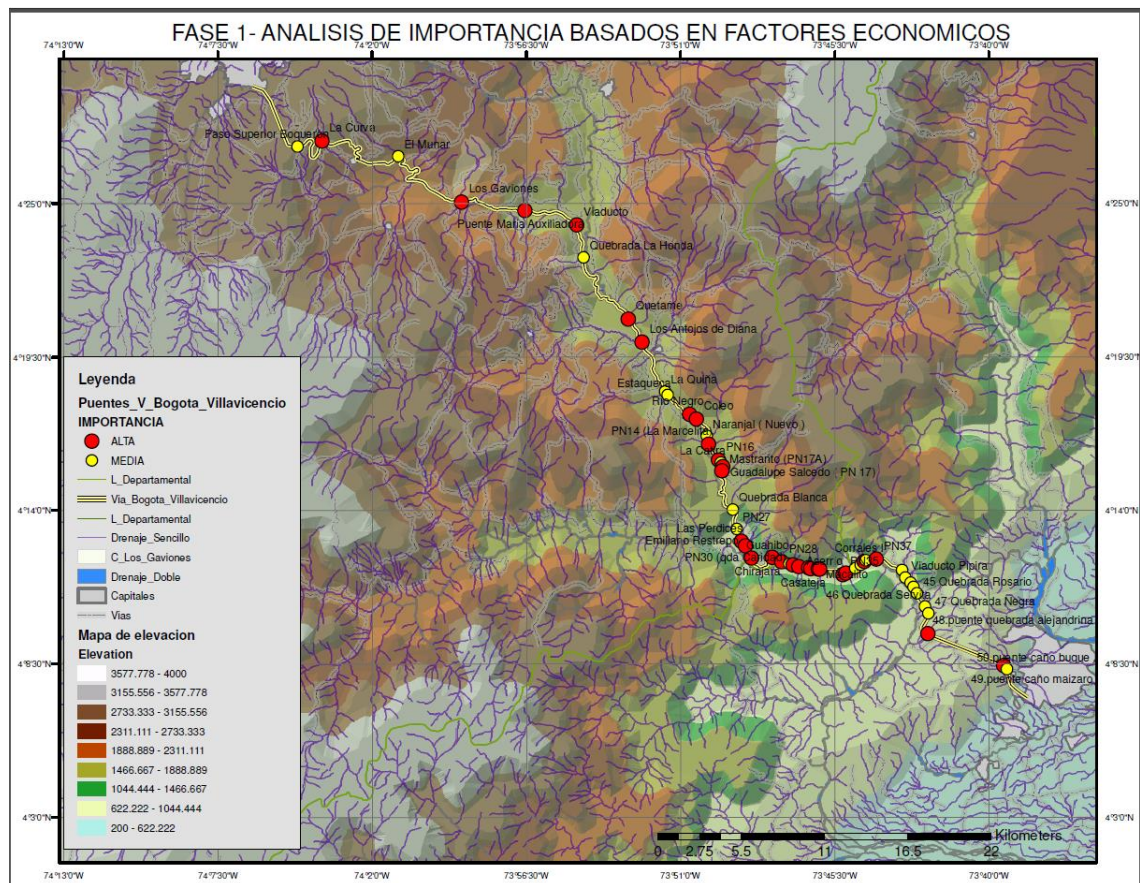
6.3 Análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de la vía

6.3.1 Fase 1 Importancia y vulnerabilidad preliminar

Importancia

Para el análisis de riesgo de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio se generaron diversos mapas de amenaza y vulnerabilidad los cuales serán presentados y analizados a continuación.

En primer lugar se generó un mapa de las importancias de los puentes basados en la metodología del presente documento explicado en el literal 5.3.1.1 Fase 1 - Etapa 1 y se presenta a continuación.



Mapa 1 Importancia de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio

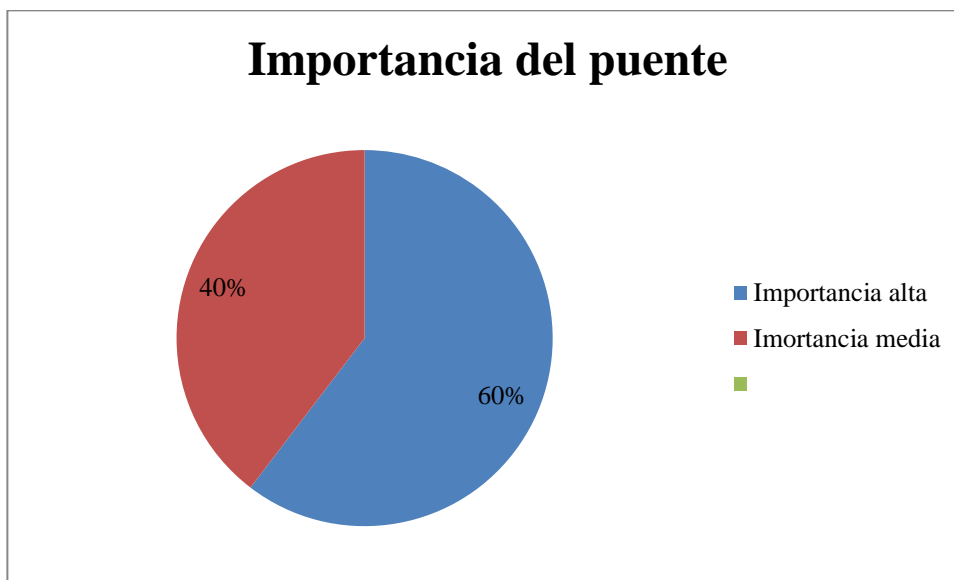


Grafico 1 Análisis de importancia de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio

Como era de esperarse todos los puentes de la vía tienen importancias de media a alta, esto se debe en gran medida al elevado número de vehículos que circulan por esta vía. En el Grafico 1 Análisis de importancia de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio notamos que el 40% de los puentes tiene una importancia media y el 60% una importancia alta, razón por la cual se demuestra que es de gran importancia analizar esta vía. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada puente, ver Tabla 6-10 Importancia del puente.

Tabla 6-10 Importancia del puente

NOMBRE	IMPORTANCIA
Paso Superior Boquerón	MEDIA
La Curva	ALTA
El Munar	MEDIA
Los Gaviones	ALTA
Puente Maria Auxiliadora	ALTA
Viaducto	ALTA
Quebrada La Honda	MEDIA
Quetame	ALTA
Los Antojos de Diana	ALTA
La Quiña	MEDIA
Estaqueca	MEDIA
Río Negro	ALTA
Coleo	ALTA
Naranjal (Viejo)	MEDIA
Naranjal (Nuevo)	MEDIA



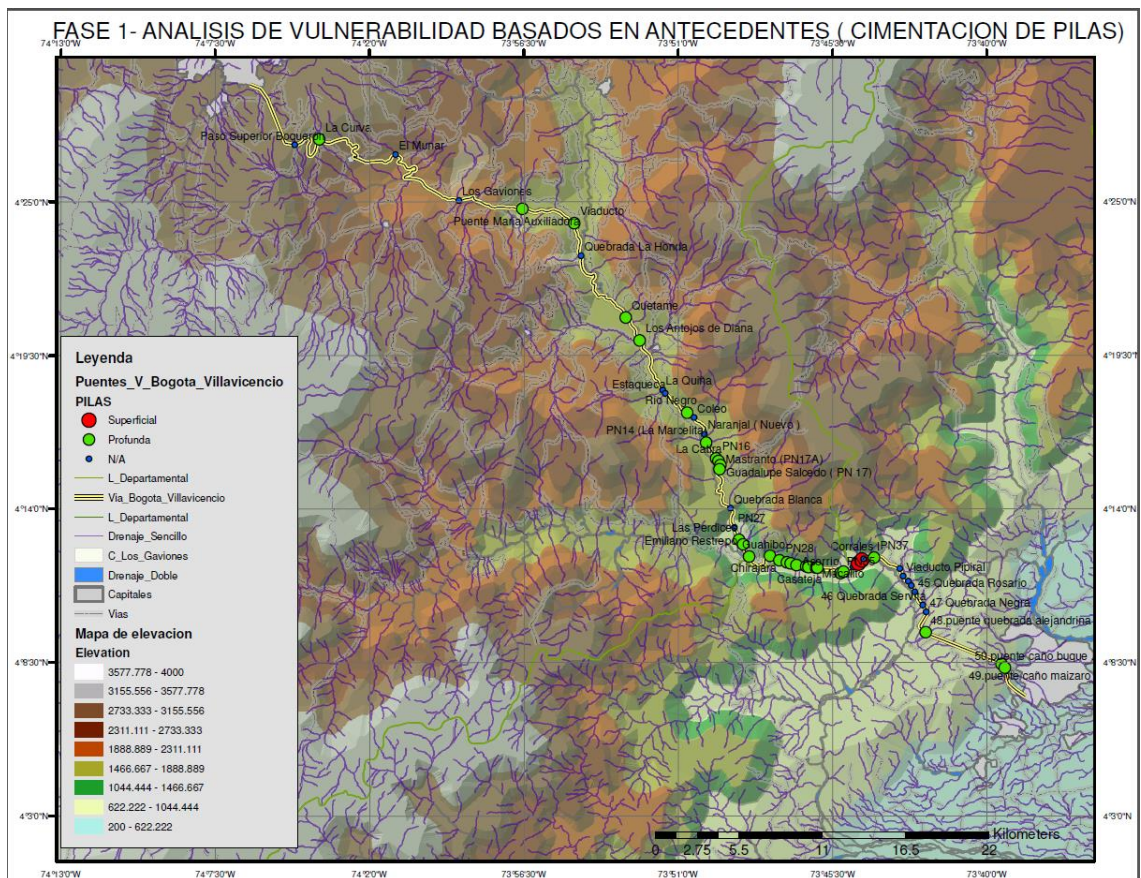
PN14 (La Marcelita)	ALTA
La Marcelita	MEDIA
PN16	ALTA
La Catira	MEDIA
Guadalupe Salcedo (PN 17)	ALTA
Mastranto (PN17A)	ALTA
Quebrada Blanca	MEDIA
PN27	MEDIA
Las Perdices	ALTA
Emiliano Restrepo	ALTA
Guahibo	ALTA
Chirajara	ALTA
PN28	ALTA
El Joropo (PN29)	MEDIA
PN30 (qda Caridad)	ALTA
Aserrío	ALTA
Quebrada La Pala (PN32)	ALTA
Casateja	ALTA
Macalito	ALTA
Chorrerón (PN33A)	ALTA
PN35	ALTA
Guaduales (PN35A)	ALTA
Chiguire (35B)	MEDIA
Susumuco (Sección vigas de alma llena)	MEDIA
Corrales I	ALTA
Corrales II	MEDIA
PN37	ALTA
41.paso a desnivel pipiral	MEDIA
43.puente quebrada coloradita	MEDIA
48.puente quebrada alejandrina	ALTA
49.puente caño maizaro	ALTA
50.puente caño buque .	MEDIA
Viaducto Pipiral	MEDIA
44 Quebrada Florestea	MEDIA
45 Quebrada Rosario	MEDIA
46 Quebrada Servita	MEDIA
47 Quebrada Negra	MEDIA

Vulnerabilidad

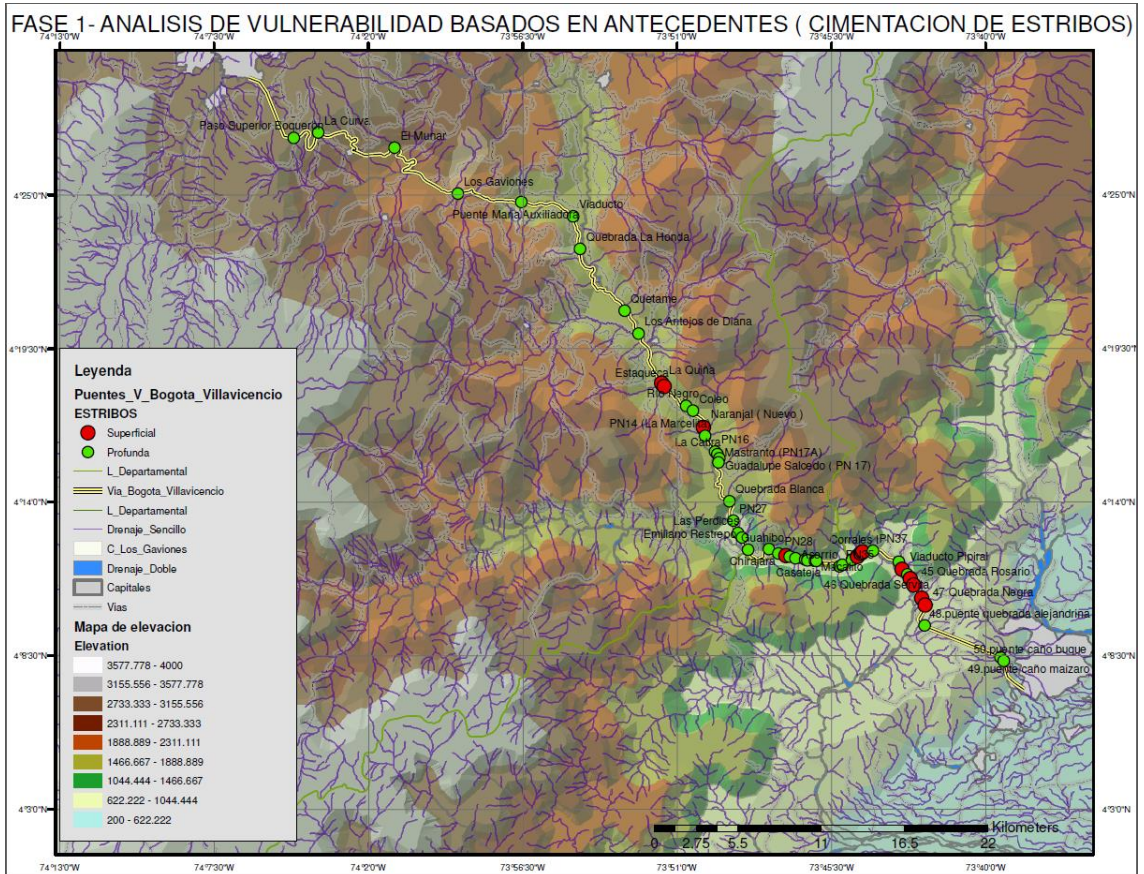
De la fase 1 obtenemos resultados de importancia, los cuales fueron anteriormente analizados y resultados de vulnerabilidad. Esta etapa se desarrolla conforme al literal 5.3.1.2 Fase 1 – Etapa 2 .

A continuación se presenta la distribución según el tipo de cimentación encontrada a lo largo de los puentes. Para este fin se generaron 2 mapas:

- Mapa 2 Análisis de vulnerabilidad basados en antecedentes (cimentación de pilas)
- Mapa 3 Análisis de vulnerabilidad basados en antecedentes (cimentación de estribos)



Mapa 2 Análisis de vulnerabilidad basados en antecedentes (cimentación de pilas)



Mapa 3 Análisis de vulnerabilidad basados en antecedentes (cimentación de estribos)

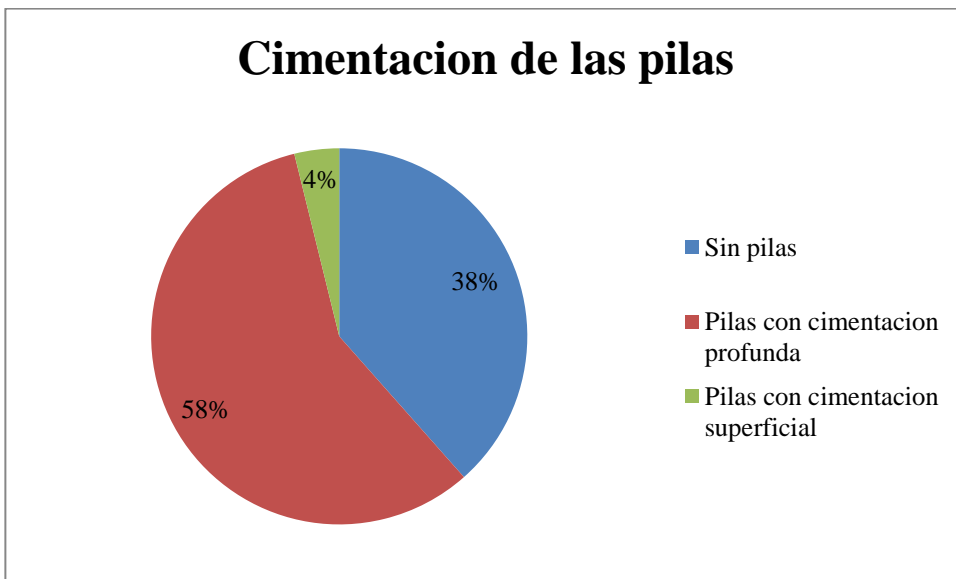


Gráfico 2 Distribución según tipo de cimentación en pilas

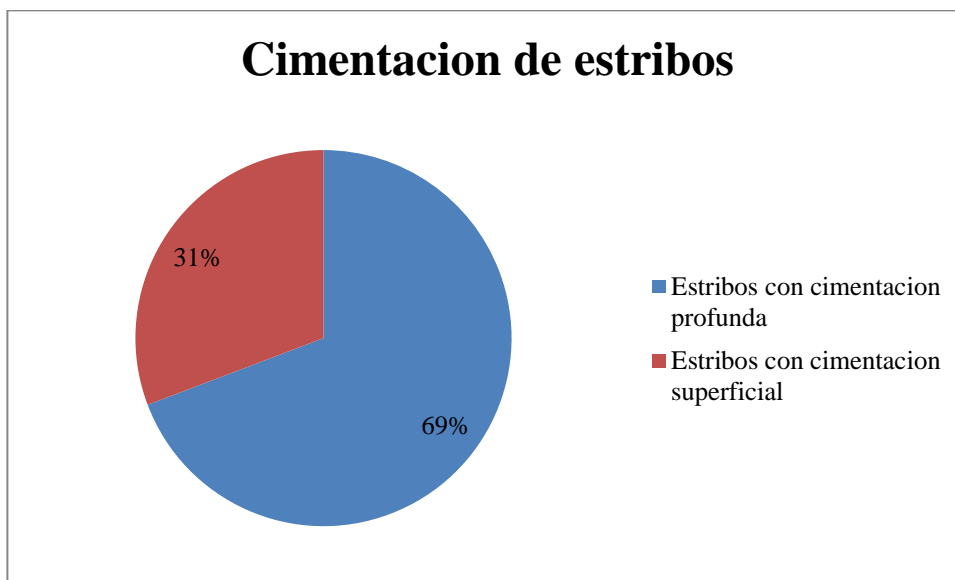


Gráfico 3 Distribución según tipo de cimentación en estribos

Como se puede apreciar de los mapas y los gráficos anteriores, la mayoría de los puentes poseen cimentación profunda, el 62% de los puentes tiene pilas de los cuales el 58% posee una cimentación profunda. Así mismo en los estribos el 69% de los puentes tiene cimentación profunda. Esta información fue recopilada del inventario de inspección visual realizado por el INVIAS en el 1997 y fue complementada con la información de la concesión. A continuación se presenta la Tabla 6-11 Recopilación de registros de cimentación en pilas y estribos de los puentes.

Tabla 6-11 Recopilación de registros de cimentación en pilas y estribos de los puentes

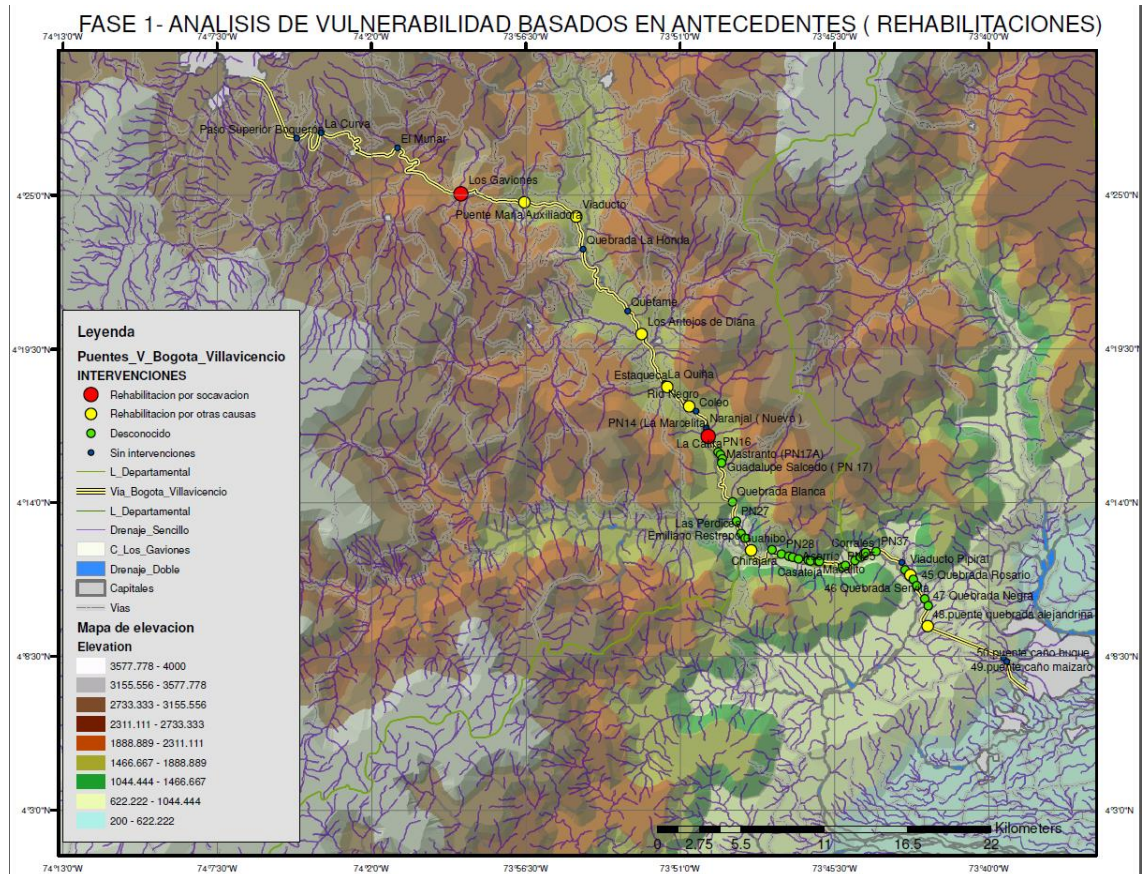
NOMBRE	PILAS	ESTRIBOS
Paso Superior Boquerón	N/A	Profunda
La Curva	Profunda	Profunda
El Munar	N/A	Profunda
Los Gaviones	N/A	Profunda
Puente Maria Auxiliadora	Profunda	Profunda
Viaducto	Profunda	Profunda
Quebrada La Honda	N/A	Profunda
Quetame	Profunda	Profunda
Los Antojos de Diana	Profunda	Profunda
La Quiña	N/A	Superficial
Estaqueca	N/A	Superficial
Río Negro	Profunda	Profunda
Coleo	N/A	Profunda
Naranjal (Viejo)	Profunda	Superficial



Naranjal (Nuevo)	N/A	Superficial
PN14 (La Marcelita)	Profunda	Profunda
La Marcelita	N/A	Superficial
PN16	Profunda	Profunda
La Catira	Profunda	Profunda
Guadalupe Salcedo (PN 17)	Profunda	Profunda
Mastranto (PN17A)	Profunda	Profunda
Quebrada Blanca	N/A	Profunda
PN27	N/A	Profunda
Las Perdices	Profunda	Profunda
Emiliano Restrepo	Profunda	Profunda
Guahibo	Profunda	Profunda
Chirajara	Profunda	Profunda
PN28	Profunda	Profunda
El Joropo (PN29)	Profunda	Superficial
PN30 (qda Caridad)	Profunda	Profunda
Aserrío	Profunda	Profunda
Quebrada La Pala (PN32)	Profunda	Profunda
Casateja	Profunda	Profunda
Macalito	Profunda	Profunda
Chorrerón (PN33A)	Profunda	Profunda
PN35	Profunda	Profunda
Guaduales (PN35A)	Profunda	Profunda
Chiguire (35B)	N/A	Profunda
Susumuco (Sección vigas de alma llena)	Superficial	Superficial
Corrales I	Superficial	Superficial
Corrales II	N/A	Superficial
PN37	Profunda	Profunda
41.paso a desnivel pipiral	N/A	Profunda
43.puente quebrada coloradita	N/A	Profunda
48.puente quebrada alejandrina	Profunda	Profunda
49.puente caño maizaro	Profunda	Profunda
50.puente caño buque .	Profunda	Profunda
Viaducto Pipiral	N/A	Superficial
44 Quebrada Florestea	N/A	Superficial
45 Quebrada Rosario	N/A	Superficial
46 Quebrada Servita	N/A	Superficial
47 Quebrada Negra	N/A	Superficial



Adicionalmente durante las dos visitas de campo que se realizaron se lograron recopilar los datos de las rehabilitaciones de los puentes, en estas se encontró que dos de puentes habían sido rehabilitados anteriormente por socavación, estos puentes son Los Gaviones y La Marcelita ambos localizados en el departamento de Cundinamarca. A continuación se presenta el Mapa 4 Intervenciones de los Puentes de la Vía Bogotá Villavicencio.



Mapa 4 Intervenciones de los Puentes de la Vía Bogotá Villavicencio

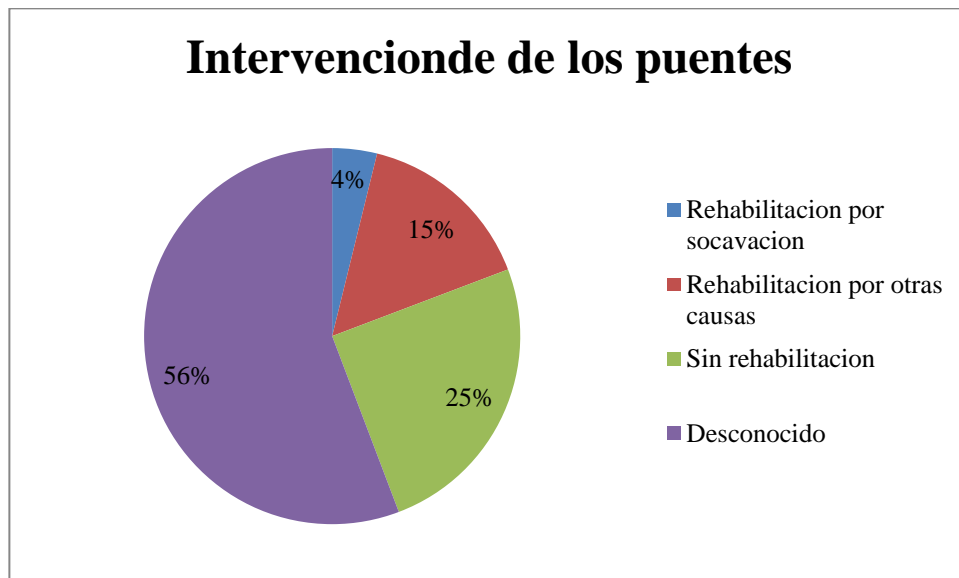
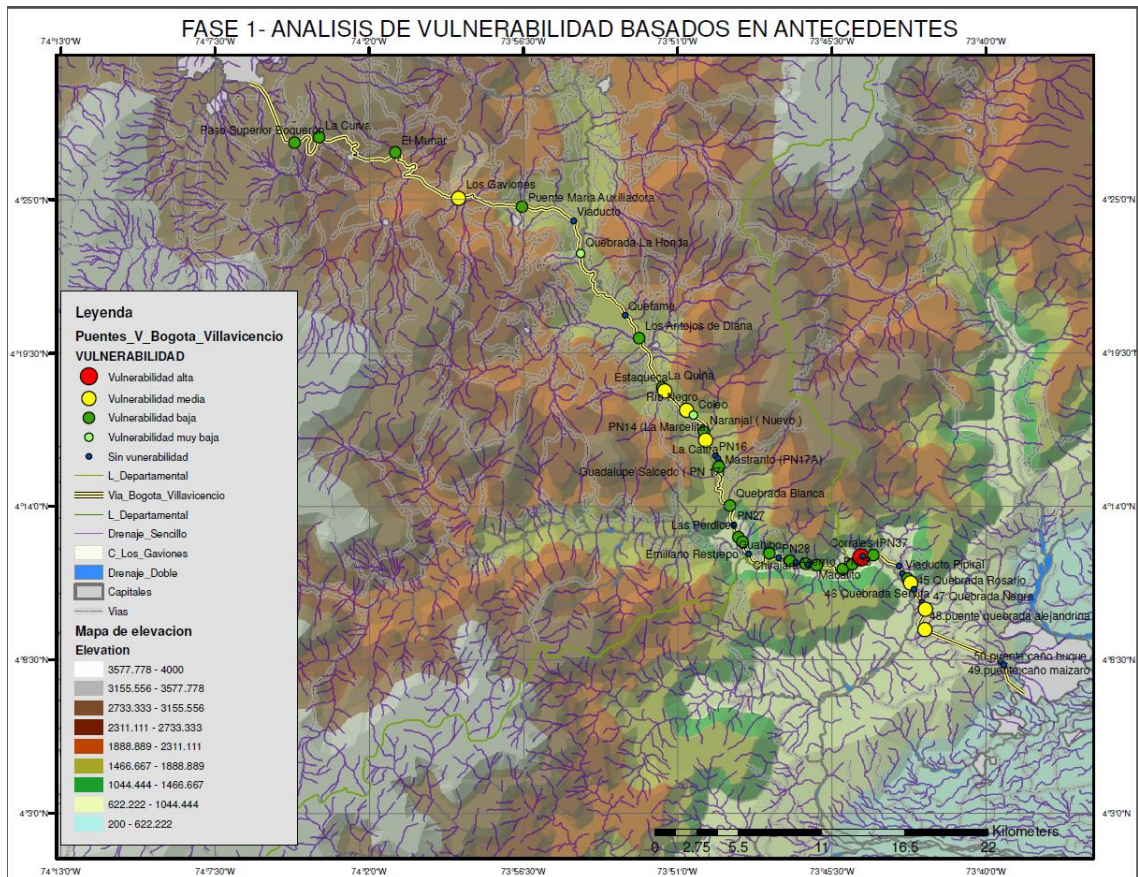


Gráfico 4 Intervenciones de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio

De este mapa podemos notar que tan solo el 4% de los puentes, los cuales corresponden a los mencionados anteriormente han sido intervenidos por socavación. El 16% de los puentes ha sido intervenido por otras causas como el puente Guamo que fue intervenido por movimiento en masa regional razón por la cual se construyeron obras de geotecnia de gran envergadura o el puente la Quiña que se vio afectado por fuertes avalanchas que sobrepasaron su estructura. Sin embargo es curioso que más de la mitad de los puentes el 56% se desconoce si han sido rehabilitados o no, esto se debe principalmente dos factores, el primero de ellos es que incluso el INVIAS desconoce siquiera la fecha de construcción de exactamente 26 puentes, es decir el 50% de los puentes de la vía. Adicionalmente esta vía fue tomada hace apenas 10 años por la concesión de Coviandes razón por la cual se desconoce en gran medida las labores anteriormente realizadas.

Para el análisis de la vulnerabilidad se tuvieron en cuenta diversos factores, entre ellos encontramos las intervenciones previas, el año de construcción y tipo de cimentación de pilas y estribos. A continuación se presenta el mapa con estos factores combinados.



Mapa 5 Vulnerabilidad de los puentes fase preliminar

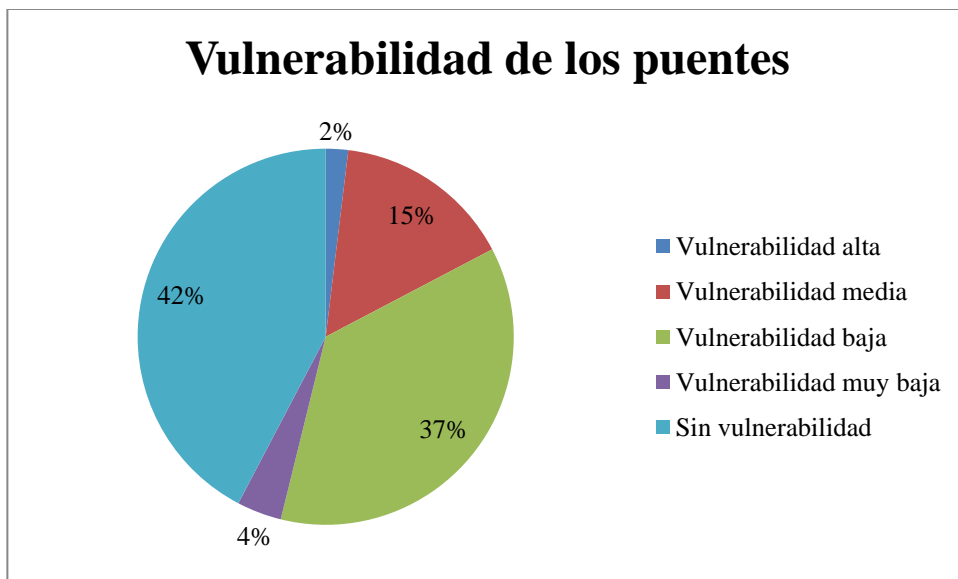


Gráfico 5 Vulnerabilidad de los puentes fase preliminar



En el análisis de vulnerabilidad notamos que el 15% de los puentes tiene una vulnerabilidad media y tan solo el 2% alta, mientras que el resto son baja o muy baja. Los puentes sin vulnerabilidad hacen referencia a aquellos que se encuentran sobre pasos a desnivel y no están cruzando una corriente de agua, es por esta razón que se considera que no tienen vulnerabilidad ante la socavación. Se puede apreciar que la vulnerabilidad de los puentes de esta vía es en su mayoría baja, esto se debe principalmente al hecho que la mayoría de los puentes presenta cimentación profunda como se vio anteriormente en Grafico 2 Distribución según tipo de cimentación en pilas y Grafico 3 Distribución según tipo de cimentación en estribos. Es importante resaltar que los puentes que han sido rehabilitados por socavación y aquellos con cimentación superficial como lo es el caso de Corrales 1 obtuvieron las puntuaciones más altas por vulnerabilidad. A continuación se presenta la tabla de calificación por vulnerabilidad.

Tabla 6-12 Calificación por vulnerabilidad de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio

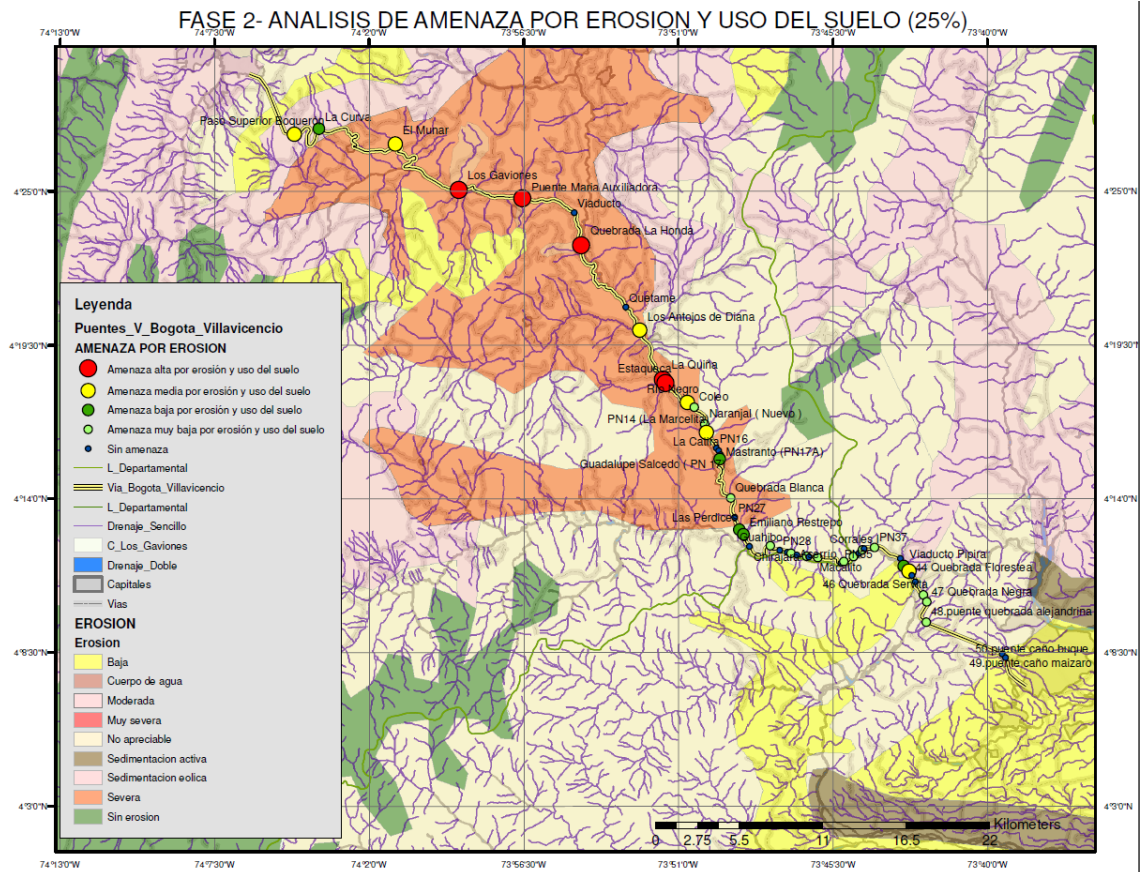
NOMBRE	VULNERABILIDAD
Paso Superior Boquerón	Vulnerabilidad baja
La Curva	Vulnerabilidad baja
El Munar	Vulnerabilidad baja
Los Gaviones	Vulnerabilidad media
Puente Maria Auxiliadora	Vulnerabilidad baja
Viaducto	Sin vulnerabilidad
Quebrada La Honda	Vulnerabilidad muy baja
Quetame	Sin vulnerabilidad
Los Antojos de Diana	Vulnerabilidad baja
La Quiña	Vulnerabilidad baja
Estaqueca	Vulnerabilidad media
Río Negro	Vulnerabilidad media
Coleo	Vulnerabilidad muy baja
Naranjal (Viejo)	Sin vulnerabilidad
Naranjal (Nuevo)	Vulnerabilidad baja
PN14 (La Marcelita)	Vulnerabilidad media
La Marcelita	Sin vulnerabilidad
PN16	Sin vulnerabilidad
La Catira	Sin vulnerabilidad
Guadalupe Salcedo (PN 17)	Sin vulnerabilidad
Mastranto (PN17A)	Vulnerabilidad baja
Quebrada Blanca	Vulnerabilidad baja
PN27	Sin vulnerabilidad



Las Perdices	Vulnerabilidad baja
Emiliano Restrepo	Vulnerabilidad baja
Guahibo	Sin vulnerabilidad
Chirajara	Vulnerabilidad baja
PN28	Sin vulnerabilidad
El Joropo (PN29)	Sin vulnerabilidad
PN30 (qda Caridad)	Vulnerabilidad baja
Aserrió	Sin vulnerabilidad
Quebrada La Pala (PN32)	Vulnerabilidad baja
Casateja	Sin vulnerabilidad
Macalito	Sin vulnerabilidad
Chorrerón (PN33A)	Vulnerabilidad baja
PN35	Sin vulnerabilidad
Guaduales (PN35A)	Vulnerabilidad baja
Chiguire (35B)	Vulnerabilidad baja
Susumuco (Sección vigas de alma llena)	Sin vulnerabilidad
Corrales I	Vulnerabilidad alta
Corrales II	Sin vulnerabilidad
PN37	Vulnerabilidad baja
41.paso a desnivel pipiral	Sin vulnerabilidad
43.puente quebrada coloradita	Vulnerabilidad baja
48.puente quebrada alejandrina	Vulnerabilidad media
49.puente caño maizaro	Sin vulnerabilidad
50.puente caño buque .	Sin vulnerabilidad
Viaducto Pipiral	Vulnerabilidad media
44 Quebrada Florestea	Sin vulnerabilidad
45 Quebrada Rosario	Sin vulnerabilidad
46 Quebrada Servita	Vulnerabilidad media
47 Quebrada Negra	Vulnerabilidad media

6.3.2 Fase 2 Análisis de factores de erosión, geología y tipo de suelo

Como se explica anteriormente en el numeral 5.4.1.1 Pesos para la evaluación de la amenaza por erosión, uso de suelo y geología de la cuenca en SIG (40%) esta etapa consiste en la evaluación de la socavación general en base a la erosión promedio de la cuenca. A continuación se presenta Mapa 6 Amenaza por erosión en la cuenca.



Mapa 6 Amenaza por erosión en la cuenca

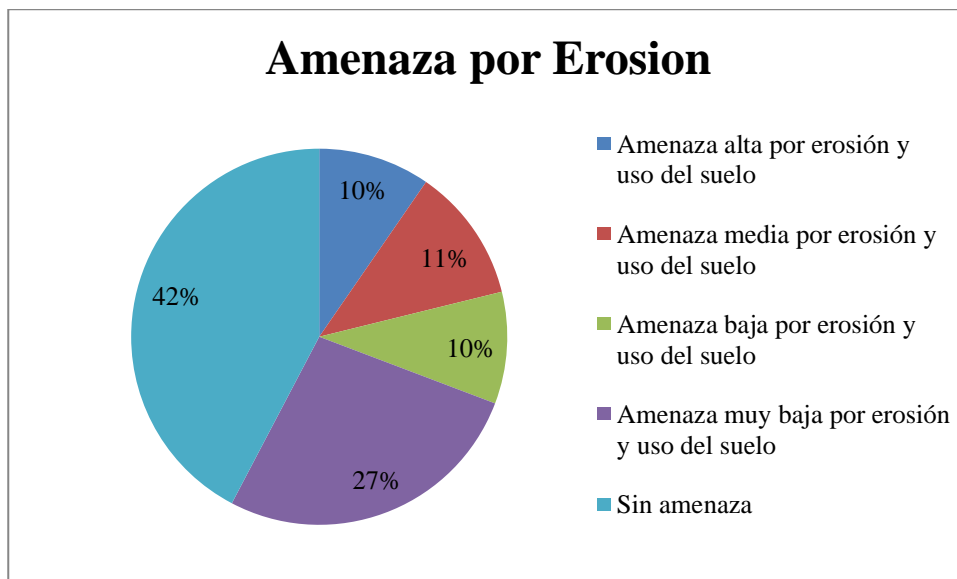


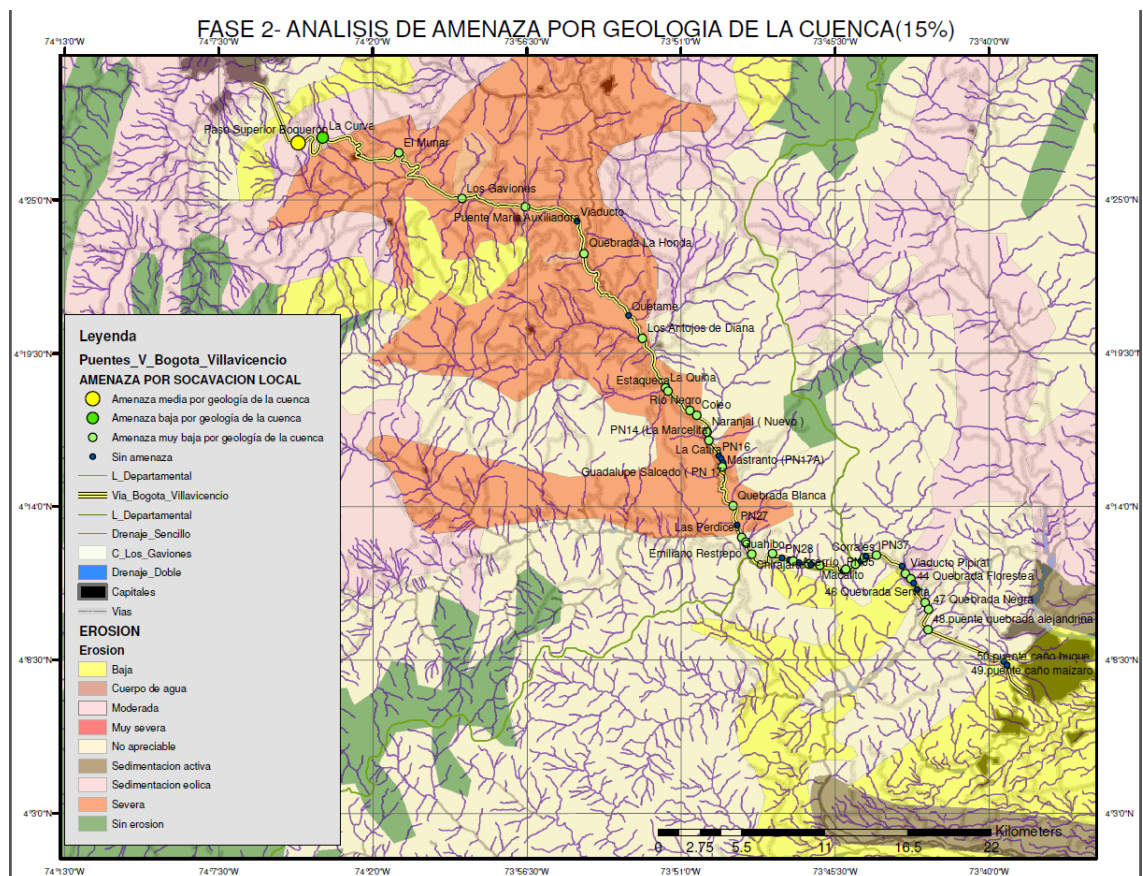
Gráfico 6 Amenaza por erosión en la cuenca

Nuevamente notamos que el 42% de los puentes no tiene amenaza, esto se debe a que todos los puentes que no se encuentran sobre un paso con una corriente de agua han sido excluidos del análisis, estos puentes corresponden



a tramos de viaducto que no poseen canales de agua bajo ellos, sino están contruidos para salvar obstáculos topográficos en la vía. En este caso encontramos que el 10% de los puentes tienen una amenaza alta producida por la socavación. Esto se debe en gran medida a que en gran parte de la zona que atraviesa la vía la erosión es severa, hecho que se debe principalmente a los usos de los suelos.

Para el análisis de amenaza por geología de la cuenca se pretendía contar con registros de perforación con el fin de determinar el estrato sobre el cual se encontraba cimentado el puente, sin embargo no fue posible conseguir dichos registros y se optó por el uso de un método alternativo para el cálculo de dicho material ver Tabla 5-14 Peso según tipo de material de cimentación. En esta etapa se utilizaron los mapas geológicos del departamento de Cundinamarca a escala 1:250.000 y el del departamento del Meta a escala 1:500.000 obtenidos del INGEOMINAS. A continuación se presenta el Mapa 7 Amenaza por geología de la cuenca de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio, el cual fue producto del análisis y mapas geológicos que se tuvieron en cuenta para este subtema



Mapa 7 Amenaza por geología de la cuenca de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio

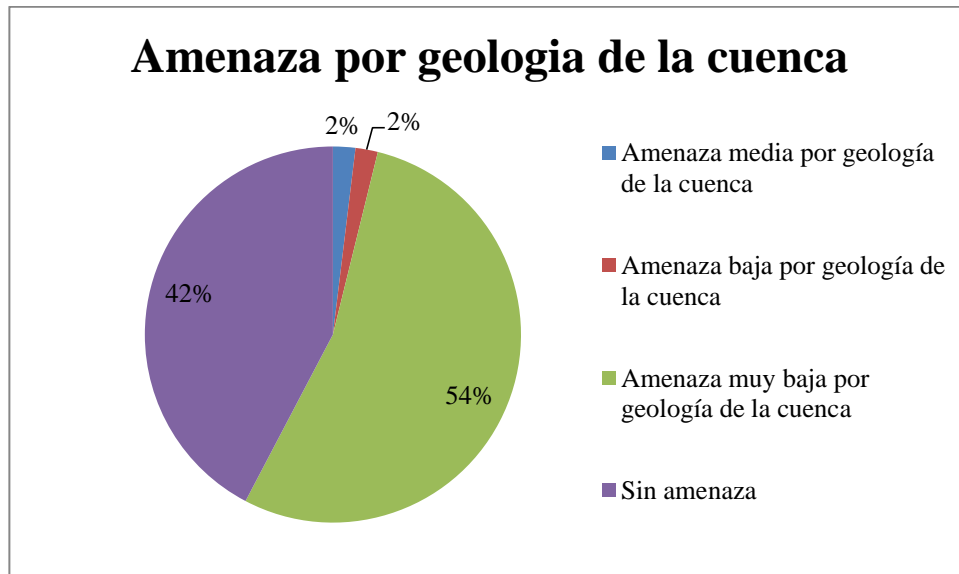
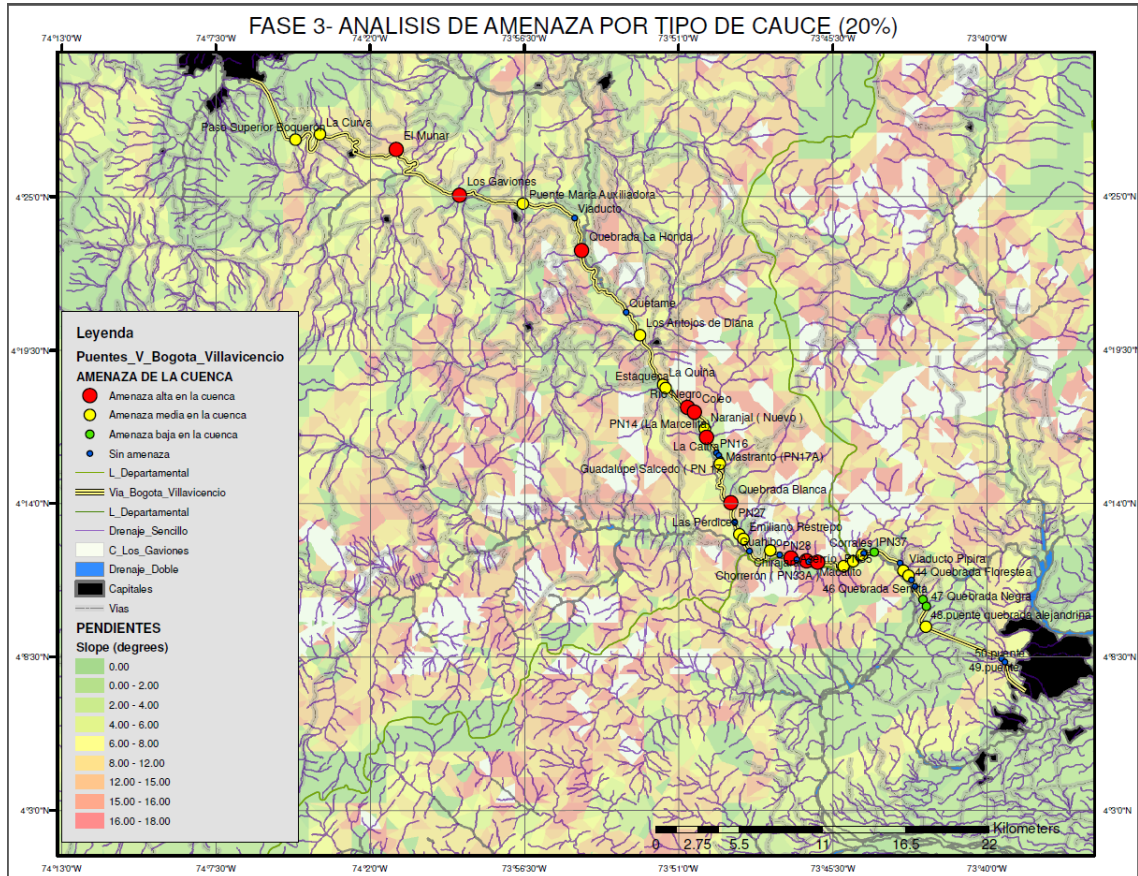


Grafico 7 Amenaza por geología de la cuenca

De esta etapa se obtuvieron valores muy bajos, esto se debe principalmente al hecho que la mayoría de los puentes se encontraban cimentados sobre depósitos correspondientes al Paleozoico y al Precámbrico. En su mayoría los materiales eran limos, areniscas y margas sin embargo cabe resaltar que este es un análisis aproximado del suelo verdadero que se encuentra bajo la cimentación del puente.

6.3.3 Fase 3 Factores climáticos y tipo de cuenca

En esta etapa se realiza un análisis de las propiedades del río que pueden llegar a afectar en el proceso de socavación como se explica en el numeral 5.5.1 Análisis de fase 3 amenaza por tipo de cauce, precipitación e implementación en SIG. A continuación se presenta el Mapa 8 Amenaza por tipo de cauce.



Mapa 8 Amenaza por tipo de cauce

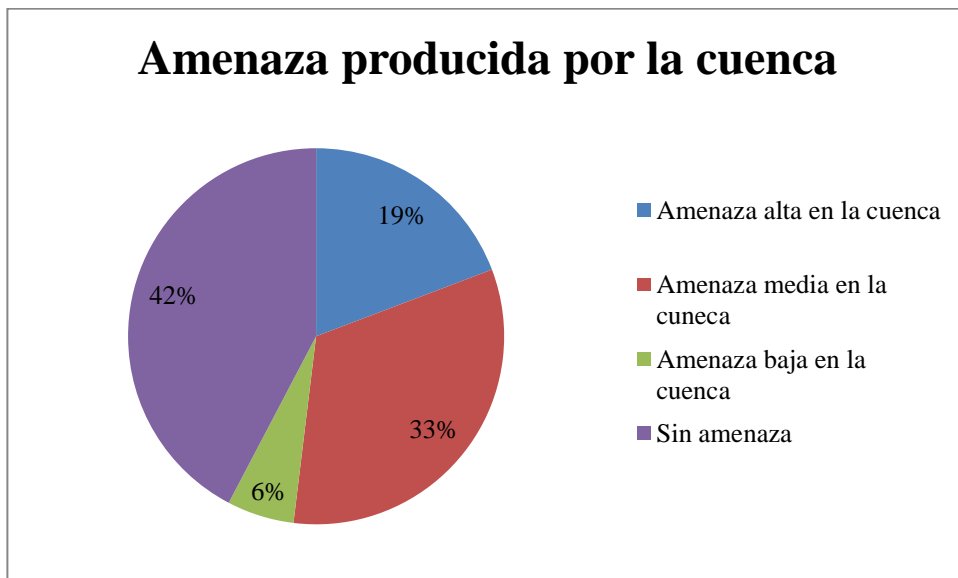
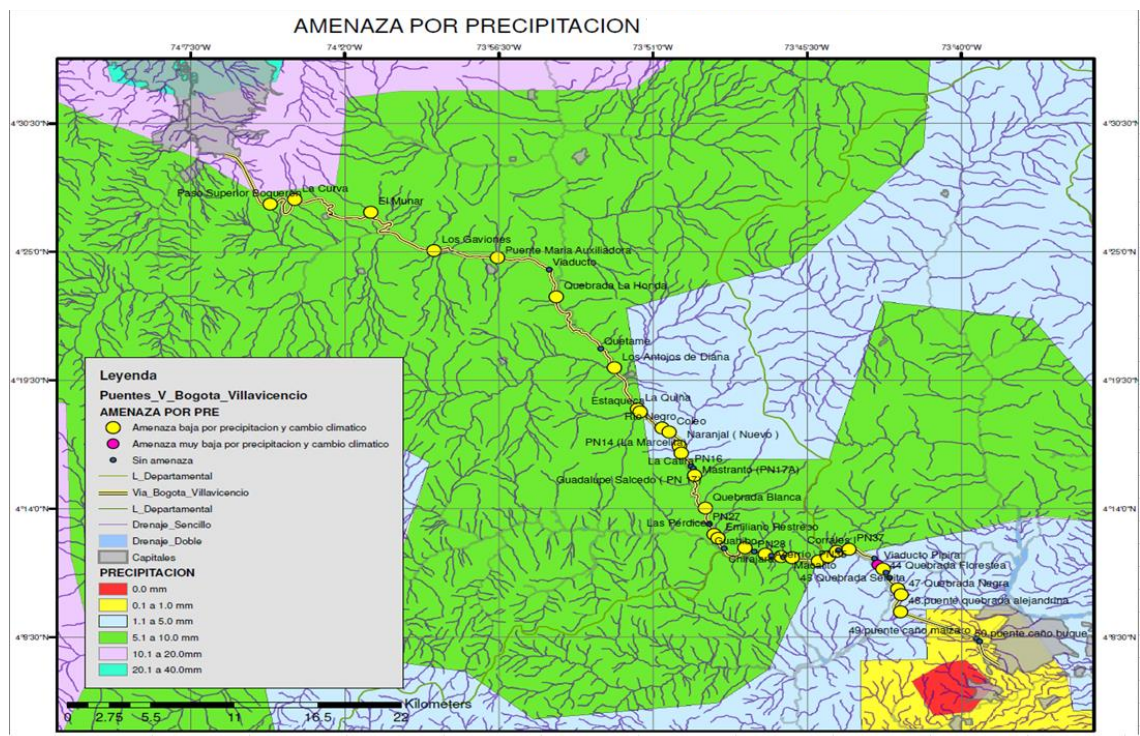


Gráfico 8 Amenaza producida por la cuenca



Encontramos que el 19% de los ríos son catalogados de amenaza alta, adicionalmente cabe resaltar que todos estos ríos se encuentran en el departamento de Cundinamarca. Esto se debe principalmente al hecho que la parte más escarpada de la vía y con pendientes más altas se encuentran en este departamento.

La etapa de análisis de la amenaza por precipitación es una de las etapas más importantes para la determinación de la amenaza. En este punto se analiza la precipitación promedio de la zona al interior de la cuenca de cada puente y la crisis invernal a través de los mapas de inundación y emergencia invernal. A continuación se presenta el Mapa 9 Amenaza por precipitación .



Mapa 9 Amenaza por precipitación

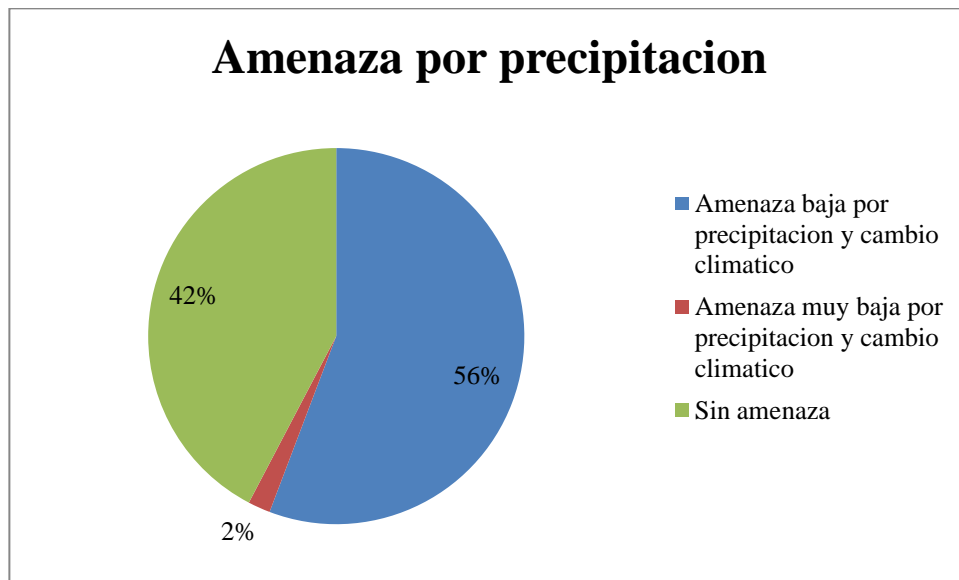
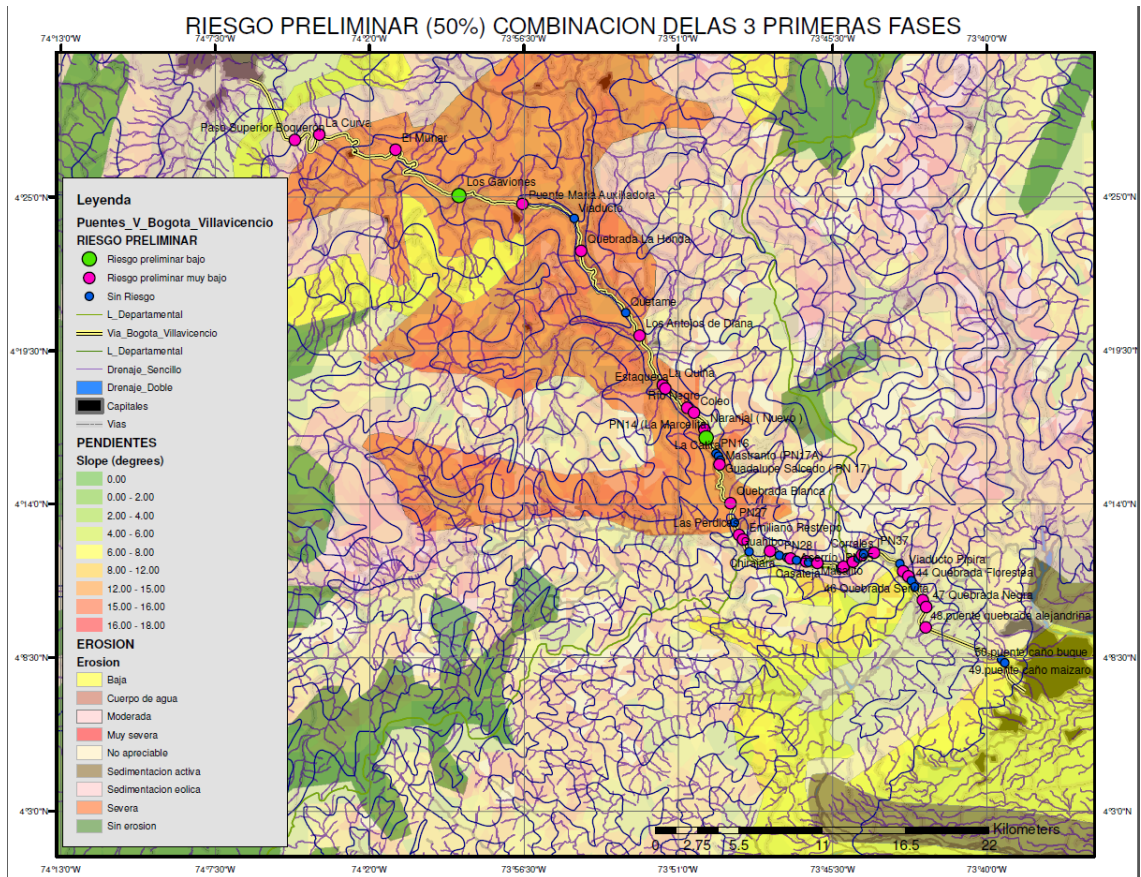


Grafico 9 Amenaza por precipitación

Podemos observar que las calificaciones ha sido bastante bajas, esto se debe en gran medida a que ninguno de los puentes se encontraba localizado en área de amenaza invernal y que al momento de tomar los datos no se habían presentado una gran acumulación de precipitación (mapa de precipitación del 1 de diciembre de 2013-IDEAM). Cabe resaltar que se deben hacer cálculos con las intensidades promedio diarias más altas de los meses, para de esta manera realizar la metodología en las condiciones críticas que generen puntuaciones importantes. Por otro lado, los mapas de intensidades deben ser mapas variables que deben estar en constante modificación y actualización.

6.3.4 Evaluación de riesgo preliminar

Para la evaluación del riesgo preliminar se deben tomar en consideración las 3 primeras etapas. De la etapa 1 se obtiene la puntuación de la vulnerabilidad, mientras que de la etapa 2 se obtiene el 40% de la calificación de la amenaza y de la etapa 3 el 60%. Finalmente se obtiene el Mapa 10 Análisis de Riesgo Preliminar por socavación.



Mapa 10 Análisis de Riesgo Preliminar por socavación

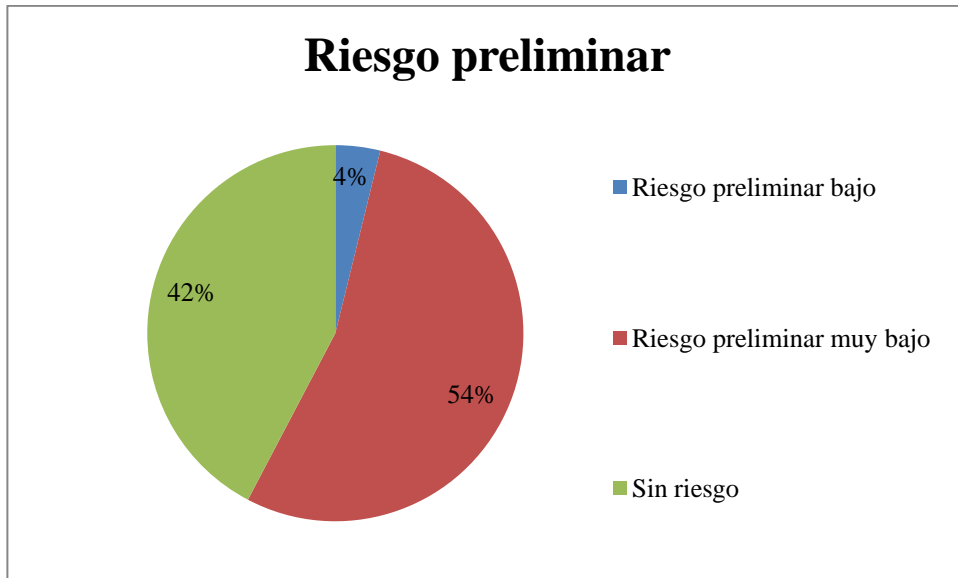


Gráfico 10 Análisis de Riesgo preliminar por socavación



De este análisis de riesgo notamos que todos los puentes se encuentran bajo un riesgo bajo o muy bajo. Se han detectados las siguientes causas por las cuales se pueda estar presentando esta situación:

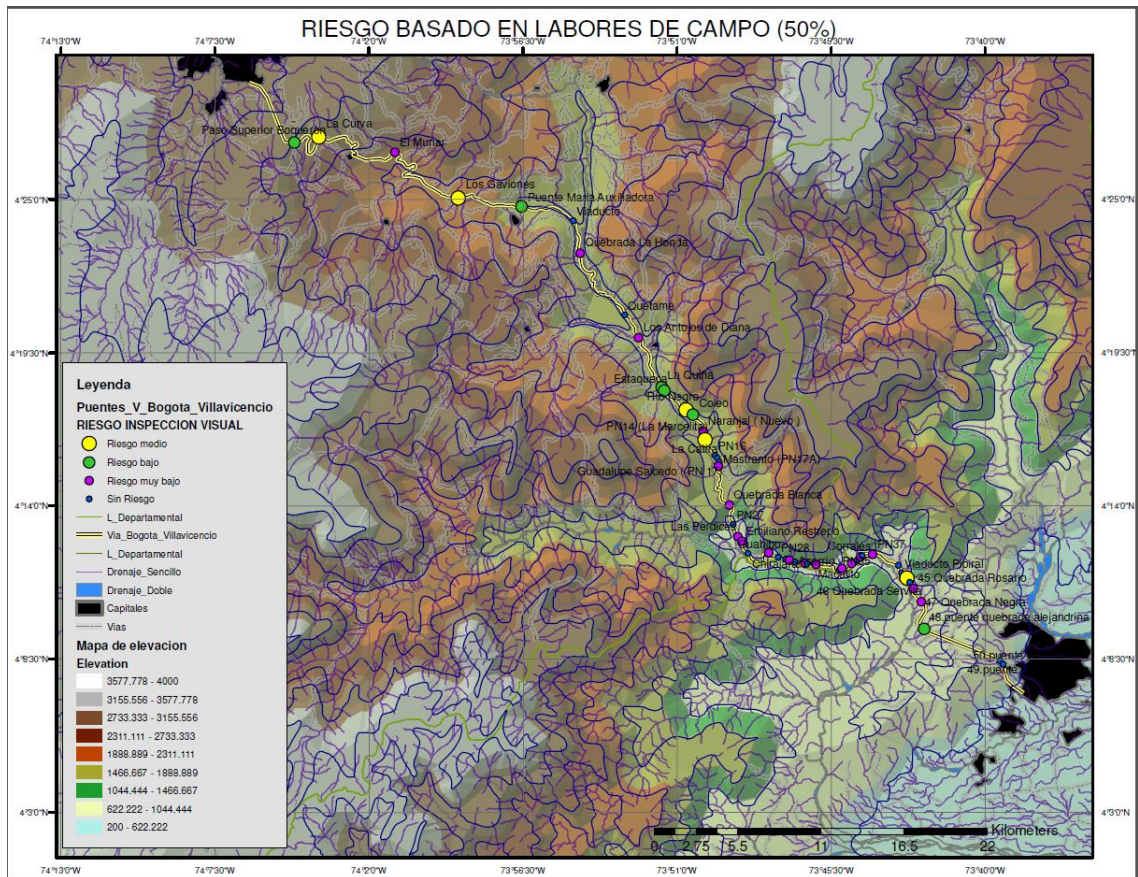
- Se tienen vulnerabilidades relativamente bajas, que se deben principalmente a la cimentación profunda.
- Aunque se tienen erosiones intermedias a lo largo de la cuenca el tipo de material de la mayoría de los puentes no estaría indicando que hay baja socavación local.
- Aunque el 20% de los ríos fue catalogado de amenaza alta, la mayoría son corrientes muy pequeñas que difícilmente socavarían el puente.
- La velocidad que es uno de los factores de más peso en el análisis de amenaza producida por el río obtuvo una calificación desconocida en todos los casos lo que garantiza al menos una puntuación intermedia de velocidades. Es probable que en la mayoría de los casos si se midiera la velocidad la puntuación de amenaza disminuiría.
- A partir de la ubicación en el SIG de los puentes y en ingreso de los mapas de emergencia invernal y zonas de inundación obtenidos del IDEAM, ninguno de los puentes se encontró localizado geográficamente en estas zonas, cabe resaltar que dichas zonas de amenaza invernal, son obtenidas de mapas de registros históricos y zonas vulnerables a la inundación.
- Las precipitaciones medidas se encontraron en un rango intermedio a bajo en la mayoría de los casos.

6.3.5 Labores de campo

La evaluación del riesgo complementario corresponde a la fase 4 de la metodología, es decir a la inspección visual. En esta etapa se evaluaron los siguientes elementos:

- Canal principal o cauce del puente (32%)
- Márgenes del río (21%)
- Superestructura (17%)
- Subestructura o infraestructura (30%)

De la inspección visual se obtuvo el Mapa 11 Riesgo por inspección visual en el cual se evaluaron los factores anteriormente mencionados.



Mapa 11 Riesgo por inspección visual

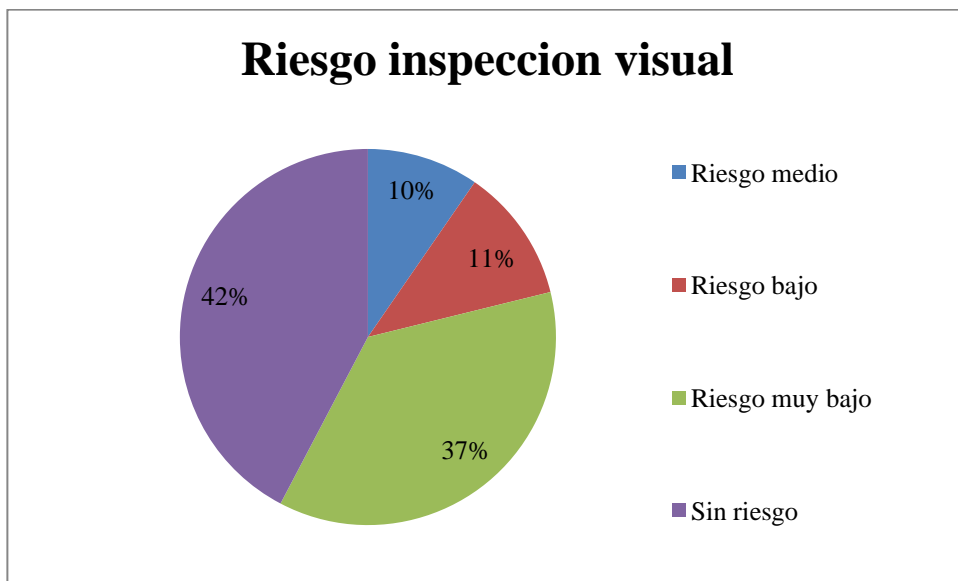


Gráfico 11 Riesgo por inspección visual

De la inspección visual se puede corroborar que lo que indicaba el análisis de riesgo preliminar estaba bastante acertado. La mayoría de los puentes se



encuentran bajo un riesgo bajo o muy bajo, tan solo el 10% se encuentra bajo un riesgo medio ante la socavación. Esto se debe en gran medida a la labor realizada por la concesión de Coviandes la cual ha tenido a cargo la vía hace 10 años y la tiene bastante bien monitoreada.

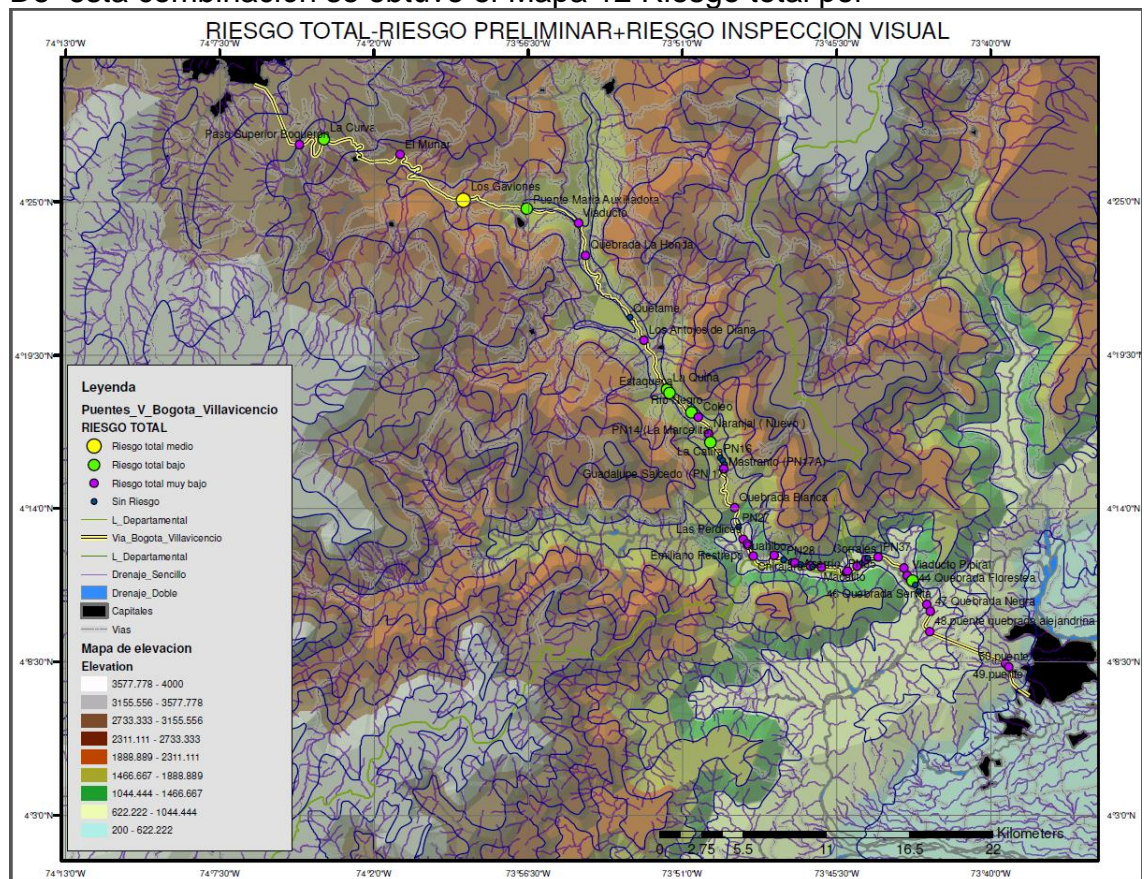
6.3.6 Evaluación de riesgo total

Finalmente obtenemos la puntuación de riesgo definitiva, que es el resultado de la combinación de las distintas etapas. Este resultado se obtiene por medio de la siguiente operación:

$$\text{Riesgo preliminar} = \text{Vulnerabilidad} F1 * (\text{Amenaza } F2 * (40\%) + \text{Amenaza } F3 * (60\%))$$

$$\text{Riesgo total} = \text{Riesgo preliminar} * 50\% + \text{Riesgo Inspección Visual} * 50\%$$

De esta combinación se obtuvo el Mapa 12 Riesgo total por



Mapa 12 Riesgo total por socavación

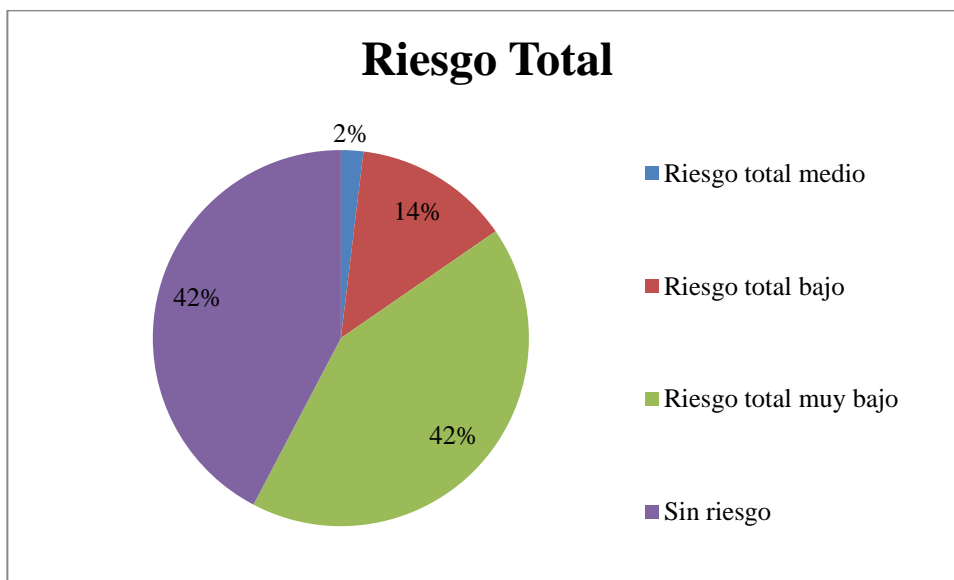


Grafico 12 Riesgo total por socavación

Finalmente podemos observar que el riesgo por socavación no supero un valor intermedio. Adicionalmente para la calificación definitiva obtenemos que tan solo el 2% de los puentes tiene un riesgo intermedio que corresponde al puente Los Gaviones.

Tabla 6-13 Calificación por riesgo total ante la socavación

NOMBRE	RIESGO TOTAL
Paso Superior Boquerón	Riesgo total muy bajo
La Curva	Riesgo total bajo
El Munar	Riesgo total muy bajo
Los Gaviones	Riesgo total medio
Puente Maria Auxiliadora	Riesgo total bajo
Viaducto	Sin Riesgo
Quebrada La Honda	Riesgo total muy bajo
Quetame	Sin Riesgo
Los Antojos de Diana	Riesgo total muy bajo
La Quiña	Riesgo total bajo
Estaqueca	Riesgo total bajo
Río Negro	Riesgo total bajo
Coleo	Riesgo total muy bajo
Naranjal (Viejo)	Sin Riesgo
Naranjal (Nuevo)	Riesgo total muy



	bajo
PN14 (La Marcelita)	Riesgo total bajo
La Marcelita	Sin Riesgo
PN16	Sin Riesgo
La Catira	Sin Riesgo
Guadalupe Salcedo (PN 17)	Sin Riesgo
Mastranto (PN17A)	Riesgo total muy bajo
Quebrada Blanca	Riesgo total muy bajo
PN27	Sin Riesgo
Las Perdices	Riesgo total muy bajo
Emiliano Restrepo	Riesgo total muy bajo
Guahibo	Sin Riesgo
Chirajara	Riesgo total muy bajo
PN28	Sin Riesgo
El Joropo (PN29)	Sin Riesgo
PN30 (qda Caridad)	Riesgo total muy bajo
Aserrío	Sin Riesgo
Quebrada La Pala (PN32)	Riesgo total muy bajo
Casateja	Sin Riesgo
Macalito	Sin Riesgo
Chorrerón (PN33A)	Riesgo total muy bajo
PN35	Sin Riesgo
Guadales (PN35A)	Riesgo total muy bajo
Chiguire (35B)	Riesgo total muy bajo
Susumuco (Sección vigas de alma llena)	Sin Riesgo
Corrales I	Riesgo total muy bajo
Corrales II	Sin Riesgo
PN37	Riesgo total muy bajo
41.paso a desnivel pipiral	Sin Riesgo
43.puente quebrada coloradita	Riesgo total bajo
48.puente quebrada alejandrina	Riesgo total muy bajo



49.puente caño maizaro	Sin Riesgo
50.puente caño buque .	Sin Riesgo
Viaducto Pipiral	Riesgo total muy bajo
44 Quebrada Florestea	Sin Riesgo
45 Quebrada Rosario	Sin Riesgo
46 Quebrada Servita	Riesgo total muy bajo
47 Quebrada Negra	Riesgo total muy bajo

Podemos apreciar que los puentes que recibieron las calificaciones más altas son los que han tenido problemas asociados con la socavación como lo son el puente Marcelita y los gaviones y aquellos que se encuentran sobre los ríos más fuertes como los son rio Negro y la Quebrada Coloradita.

6.4 Validación SIPUCOL

Como forma de validación de la tesis se cuenta con las calificaciones realizadas por el INVIAS siguiendo la metodología de SIPUCOL para inspección de puentes. Se tienen los registros del año 2010.

NOMBRE	RIESGO TOTAL	CALIFICACION	SIPUCOL
Paso Superior Boquerón	Riesgo total muy bajo	1	2
La Curva	Riesgo total bajo	2	2
El Munar	Riesgo total muy bajo	1	1
Los Gaviones	Riesgo total medio	3	3
Puente Maria Auxiliadora	Riesgo total bajo	2	3
Viaducto	Sin Riesgo	0	3
Quebrada La Honda	Riesgo total muy bajo	1	0
Quetame	Sin Riesgo	0	3
Los Antojos de Diana	Riesgo total muy bajo	1	3
La Quiña	Riesgo total bajo	2	2
Estaqueca	Riesgo total bajo	2	1
Río Negro	Riesgo total bajo	2	2
Coleo	Riesgo total muy bajo	1	2
Naranjal (Viejo)	Sin Riesgo	0	3
Naranjal (Nuevo)	Riesgo total muy bajo	1	2
PN14 (La Marcelita)	Riesgo total bajo	2	2



La Marcelita	Sin Riesgo	0	2
PN16	Sin Riesgo	0	1
La Catira	Sin Riesgo	0	2
Guadalupe Salcedo (PN 17)	Sin Riesgo	0	1
Mastranto (PN17A)	Riesgo total muy bajo	1	2
Quebrada Blanca	Riesgo total muy bajo	1	1
PN27	Sin Riesgo	0	3
Las Perdices	Riesgo total muy bajo	1	1
Emiliano Restrepo	Riesgo total muy bajo	1	1
Guahibo	Sin Riesgo	0	4
Chirajara	Riesgo total muy bajo	1	2
PN28	Sin Riesgo	0	1
El Joropo (PN29)	Sin Riesgo	0	1
PN30 (qda Caridad)	Riesgo total muy bajo	1	2
Aserrío	Sin Riesgo	0	2
Quebrada La Pala (PN32)	Riesgo total muy bajo	1	1
Casateja	Sin Riesgo	0	
Macalito	Sin Riesgo	0	1
Chorrerón (PN33A)	Riesgo total muy bajo	1	1
PN35	Sin Riesgo	0	2
Guadales (PN35A)	Riesgo total muy bajo	1	2
Chiguire (35B)	Riesgo total muy bajo	1	4
Susumuco	Sin Riesgo	0	2
Corrales I	Riesgo total muy bajo	1	1
Corrales II	Sin Riesgo	0	1
PN37	Riesgo total muy bajo	1	1
41.paso a desnivel pipiral	Sin Riesgo	0	0
43.puente quebrada coloradita	Riesgo total bajo	2	3
48.puente quebrada alejandrina	Riesgo total muy bajo	1	
49.puente caño maizaro	Sin Riesgo	0	2
50.puente caño buque .	Sin Riesgo	0	1



Viaducto Pipiral	Riesgo total muy bajo	1	1
44 Quebrada Florestea	Sin Riesgo	0	1
45 Quebrada Rosario	Sin Riesgo	0	1
46 Quebrada Servita	Riesgo total muy bajo	1	1
47 Quebrada Negra	Riesgo total muy bajo	1	1

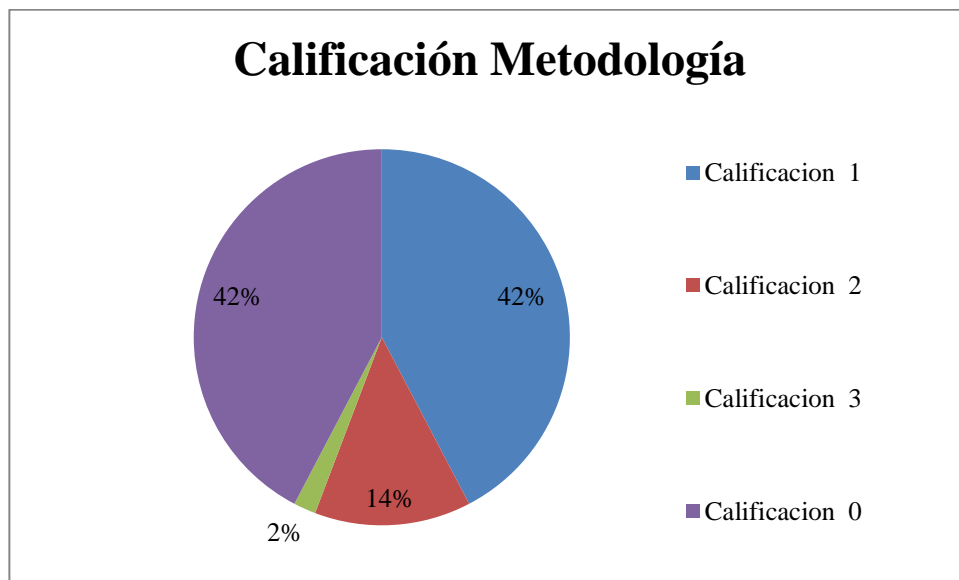


Gráfico 13 Clasificación Metodología

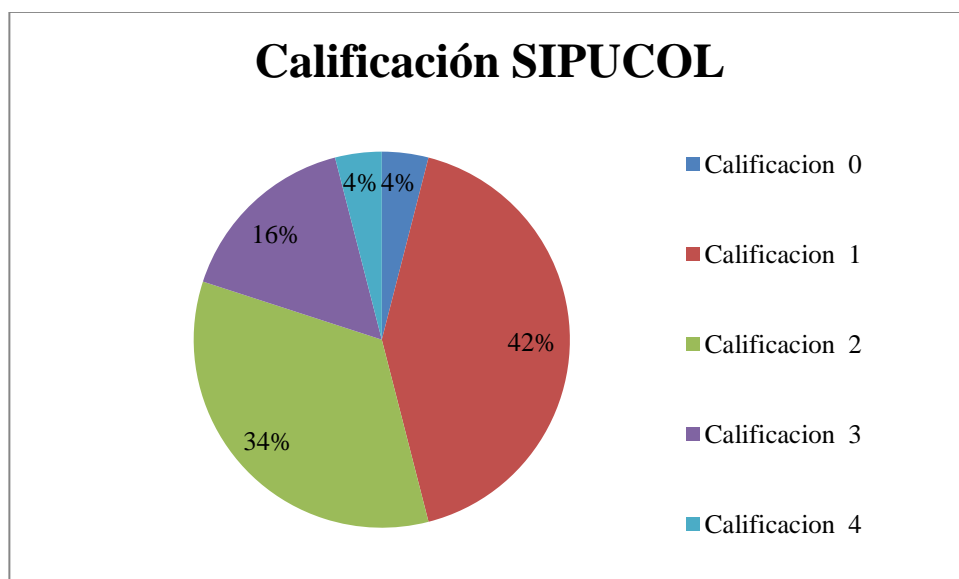


Gráfico 14 Clasificación SIPUCOL



Podemos apreciar que a lo largo de la tabla se tienen varias coincidencias en calificación, principalmente en los puentes que han sido calificados con riesgo intermedio. Sin embargo cabe resaltar que en la metodología planteada en esta tesis se tiene una mayor cantidad de puntuaciones de 0, esto se debe en gran medida al hecho que únicamente se está evaluando una variable que es la socavación a diferencia de la metodología SIPUCOL en la cual se abarcan varios aspectos.

6.5 Priorización

Para la etapa de la priorización se utiliza la Tabla 5-27 Evaluación general del riesgo ante la socavación. Adaptado de: (Melville, Et al. 2001)

		Importancia del Puente		
		Importancia Alta	Importancia Media	Importancia Baja
Riesgo del Puente ante la Socavación	Riesgo-Muy Alto	5	5	5
	Riesgo-Alto	5	4	4
	Riesgo-Medio	4	3	3
	Riesgo-Bajo	2	2	1
	Riesgo-Medio Bajo	1	1	1
	N/A			0

1. Calificaciones según importancia y vulnerabilidad: 5=muy alta, 1=baja susceptibilidad.
2. N/A no aplica, esto quiere decir que el puente no se encuentra sobre un flujo de agua, o es un puente cerrado o que este puente será reemplazado.

NOMBRE	IMPORTANCIA	RIESGO TOTAL	PRIORIZACION
Paso Superior Boquerón	MEDIA	Riesgo total muy bajo	1
La Curva	ALTA	Riesgo total bajo	2
El Munar	MEDIA	Riesgo total muy bajo	1
Los Gaviones	ALTA	Riesgo total medio	4
Puente Maria Auxiliadora	ALTA	Riesgo total bajo	2
Viaducto	ALTA	Sin Riesgo	0
Quebrada La Honda	MEDIA	Riesgo total muy bajo	1



Quetame	ALTA	Sin Riesgo	0
Los Antojos de Diana	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
La Quiña	MEDIA	Riesgo total bajo	2
Estaqueca	MEDIA	Riesgo total bajo	2
Río Negro	ALTA	Riesgo total bajo	2
Coleo	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
Naranjal (Viejo)	MEDIA	Sin Riesgo	0
Naranjal (Nuevo)	MEDIA	Riesgo total muy bajo	1
PN14 (La Marcelita)	ALTA	Riesgo total bajo	2
La Marcelita	MEDIA	Sin Riesgo	0
PN16	ALTA	Sin Riesgo	0
La Catira	MEDIA	Sin Riesgo	0
Guadalupe Salcedo (PN 17)	ALTA	Sin Riesgo	0
Mastranto (PN17A)	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
Quebrada Blanca	MEDIA	Riesgo total muy bajo	1
PN27	MEDIA	Sin Riesgo	0
Las Perdices	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
Emiliano Restrepo	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
Guahibo	ALTA	Sin Riesgo	0
Chirajara	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
PN28	ALTA	Sin Riesgo	0
El Joropo (PN29)	MEDIA	Sin Riesgo	0
PN30 (qda Caridad)	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
Aserrío	ALTA	Sin Riesgo	0
Quebrada La Pala (PN32)	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
Casateja	ALTA	Sin Riesgo	0
Macalito	ALTA	Sin Riesgo	0
Chorrerón (PN33A)	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
PN35	ALTA	Sin Riesgo	0
Guaduales (PN35A)	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
Chiguire (35B)	MEDIA	Riesgo total muy bajo	1

Susumuco	MEDIA	Sin Riesgo	0
Corrales I	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
Corrales II	MEDIA	Sin Riesgo	0
PN37	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
41.paso a desnivel pipiral	MEDIA	Sin Riesgo	0
43.puente quebrada coloradita	MEDIA	Riesgo total bajo	2
48.puente quebrada alejandrina	ALTA	Riesgo total muy bajo	1
49.puente caño maizaro	ALTA	Sin Riesgo	0
50.puente caño buque .	MEDIA	Sin Riesgo	0
Viaducto Pipiral	MEDIA	Riesgo total muy bajo	1
44 Quebrada Florestea	MEDIA	Sin Riesgo	0
45 Quebrada Rosario	MEDIA	Sin Riesgo	0
46 Quebrada Servita	MEDIA	Riesgo total muy bajo	1
47 Quebrada Negra	MEDIA	Riesgo total muy bajo	1

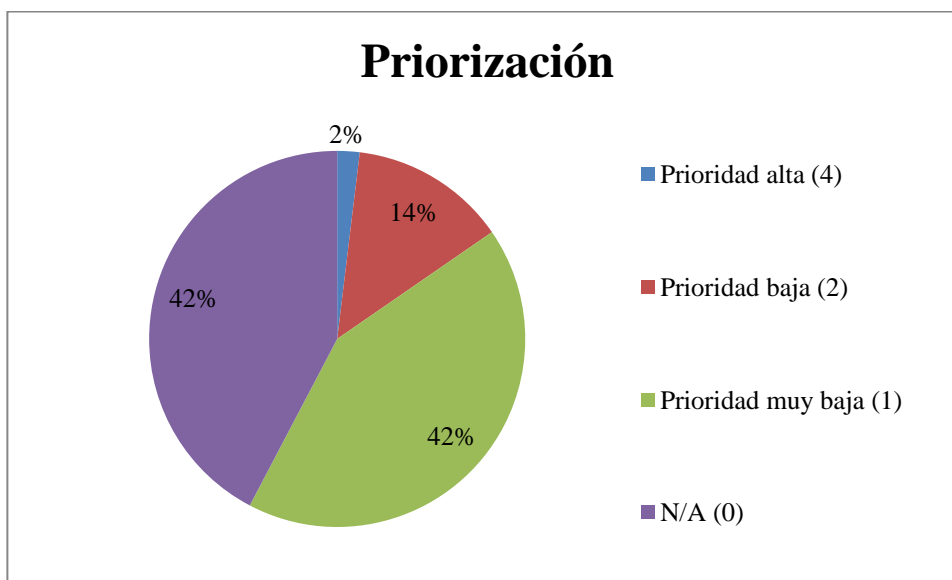


Gráfico 15 Priorización por importancia y riesgo

Como era de esperarse los puentes que han sufrido eventos históricos por socavación fueron los que mayor puntuación obtuvieron, solo el 2% de los puentes que corresponde al puente de Los Gaviones tienen prioridad alta. A continuación se presentan dos tablas resumen con los puentes más críticos de este análisis.

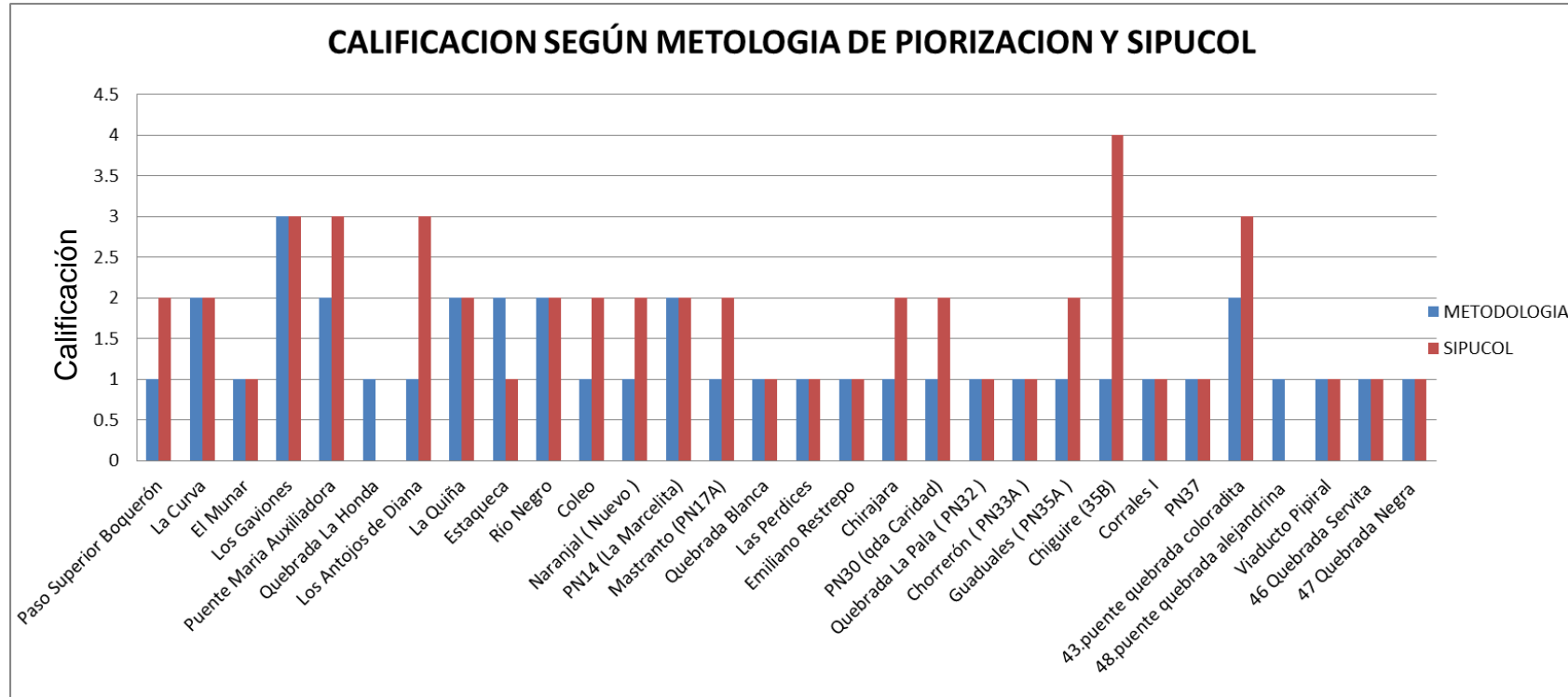


Figura 6-2C Comparacion metodologia propia y SIPUCOL



De la Figura 6-2 se puede concluir que en ambas metodologías la mayoría de los puentes se encuentran con un puntaje de 1, Para SIPUCOL encontramos que es el 42%, esto quiere decir que 21 puentes tienen daños pequeños. Por otro lado en la metodología planteada se encontró que 20 puentes que corresponden al 40% de los analizados se encuentran bajo un riesgo muy bajo ante socavación. Es evidente que aunque el SIPUCOL genere una calificación de un daño difícilmente se puede tomar una decisión en base a un riesgo.

Tabla 6-14 Tabla de importancia, intervenciones y vulnerabilidad de los puentes críticos

NOMBRE	IMPORTANCIA	INTERVENCIONES	VULNERABILIDAD
Los Gaviones	ALTA	Rehabilitación por socavación	Vulnerabilidad media
Río Negro	ALTA	Rehabilitación por otras causas	Vulnerabilidad media
PN14 (La Marcelita)	ALTA	Rehabilitación por socavación	Vulnerabilidad media

Tabla 6-15 Tabla resumen de riesgo total y priorización

	RIESGO TOTAL	PRIORIZACION
Los Gaviones	Riesgo total medio	4
Río Negro	Riesgo total bajo	2
PN14 (La Marcelita)	Riesgo total bajo	2

Finalmente la metodología nos indica que el puente Los Gaviones puentes deben ser sometidos a una inspección más detallada de socavación usando métodos para el cálculo de la socavación o instrumentación.

7 CONCLUSIONES

- Se realizó una investigación sobre el estado del conocimiento de la evaluación de la socavación de puentes a nivel nacional e internacional, encontrándose diversos tipos de metodologías para la evaluación de la socavación basados en: inspección visual, inspección especial e inspección por monitoreo e instrumentación. Una de las metodologías de inspección visual más importantes fue desarrollada en Nueva Zelanda por (Melville, Bridge-Scour Screening Methodology for New Zealand Bridges, 2001) en la cual a través de la inspección visual se evalúa el riesgo por socavación que tienen los puentes. Acerca de esta propuesta metodológica es importante resaltar que se evalúan diversos factores que permiten dar una calificación de importancia al puente. Un valioso aporte de esta metodología es que está diseñada para que se desarrolle de forma distinta según el caso específico para cada puente.



Otra de las principales fue la desarrollada en Estados Unidos por (Richardson E. A., Evaluating Scour At Bridges , 2000), Hec-18, la cual analiza la susceptibilidad del puente ante la socavación y adicionalmente realiza un análisis de prioridad. Cabe resaltar que esta metodología, como su nombre lo dice, se basa en un aplicativo computacional desarrollado en el programa Hec-18, en cuyas actualizaciones más recientes, no solo se plantea la metodología para la evaluación de la socavación, sino que además contiene una metodología para el diseño preventivo ante este fenómeno. Así mismo el (Forest Services, 1998) de los Estados Unidos aplica una metodología análoga que consiste en el análisis de características geométricas, número de pilas y factores dinámicos, principalmente de la cuenca, donde a través de un aplicativo computacional (CAESAR) determina la susceptibilidad o riesgo de socavación.

Finalmente, encontramos metodologías más complejas donde se realizan análisis de socavación por medio de instrumentación especializada. El caso más representativo es el de (Fukui, Development of the new Inspection Method on Scour Condition around Existing Bridge Foundations, 2000) desarrollada en Japón, en el que por medio de sonares se realiza un análisis en tiempo real de la conducta del lecho del río para predecir su futuro comportamiento frente a la socavación.

A nivel nacional se tuvieron en cuenta principalmente dos metodologías. La desarrollada por el INVIAS a través de SIPUCOL, la cual no está diseñada especialmente para solamente la evaluación de la socavación, pero que cuenta con un capítulo relacionado con este tema. La segunda fue desarrollada por la Universidad del Cauca (Guevara, 1998) , donde se hace un estudio enfocado principalmente en el análisis de los tipos de socavación puntuales, prevención y control de la misma por medio de formulaciones matemáticas.

La utilidad de estos métodos en el desarrollo de la tesis radica principalmente en que sirvieron o fueron base para la estructuración de una nueva metodología de priorización. Se realizaron adaptaciones del análisis de prioridad, encontrado en (Melville B. W., 2000) un punto de referencia, ya que en sus investigaciones se combina la importancia del puente con el riesgo por socavación y se obtiene una calificación válida para el proceso de priorización. De las metodologías que se investigaron



que utilizan aplicativos computacionales se adaptó la idea del uso de los mismos y de la implementación de nuevas tecnologías en función del análisis para la priorización de la socavación adaptadas a las condiciones del medio nacional. Adicionalmente se adoptó en esta metodología el concepto del análisis de riesgo por medio de la evaluación previa de amenaza y vulnerabilidad.

- Se implementó un aplicativo computacional para el desarrollo de la metodología propuesta, que consta de cuatro (4) fases, la cual fue concebido en Excel apoyada en el sistema de Información Geográfica ArcGIS. Como se menciona a lo largo del presente documento, se logró el objetivo principal de la tesis con este aplicativo, que era la priorización de los puentes más críticos por el fenómeno de socavación. El aplicativo demostró ser de gran ayuda a la hora de priorizar, sin embargo cabe resaltar que fue gracias a la implementación del sistema de información geográfica ArcGIS.

Gracias a la gran versatilidad y poder del SIG se lograron generar mapas de amenaza y vulnerabilidad con el fin de poder evaluar el riesgo de los puentes ante el fenómeno de socavación. Estos mapas fueron el resultado de la implementación de la metodología y la consecución de la información que permitieron un análisis preliminar de riesgo frente a la socavación. Los mapas generados en el documento fueron:

- Mapas de importancia
- Mapas de vulnerabilidad basado en antecedentes
- Mapas de amenaza por erosión y uso del suelo
- Mapas de amenaza por geología de la cuenca
- Mapas de amenaza por el tipo de cauce
- Mapas de amenaza por precipitación
- Mapas de análisis de riesgo preliminar
- Mapas de riesgo por inspección visual
- Mapas de riesgo total

Aunque los análisis realizados en el ArcGIS fueron de gran ayuda para la evaluación de la socavación cabe resaltar que sin importar que sea una herramienta sumamente poderosa su precisión a la hora de analizar



un parámetro depende principalmente de la calidad y de la escala de detalle de los datos ingresados. Es por esta razón que se fue cuidadoso a la hora de elegir la precisión de los datos a ser analizados. Lo interesante de estos programas es que se pueden analizar varios parámetros simultáneamente, lo que implica una evaluación más detallada permitiendo mejorar el grado de precisión a la hora de priorizar por socavación.

- Se realizó la validación de la propuesta metodológica mediante la inspección visual en dos ocasiones de veintidós (22) puentes localizados en la vía Bogotá Villavicencio con apoyo de la Consección (Coviandes). Las inspecciones visuales fueron el complemento de las tres primeras etapas de la metodología, que están planteadas para su desarrollo en oficina. Adicionalmente se validó la metodología por medio de la comparación con los resultados que se tenían de las inspecciones y calificaciones de los puentes realizadas por el INVIAS durante el año 2007.

De los análisis realizados a los 22 puentes utilizando la metodología de SIPUCOL, se encontró que el 4% de los puentes no presentan daños, el 42% de los puentes presentan un daño pequeño, 34% presentan daño pequeño, 16% daño significativo y 4% daño grave. Sin embargo es evidente que esta metodología implementada por el INVIAS, únicamente está evaluando el estado de los puentes por socavación en forma general, generando poca información para la toma de decisiones, ya que no se identifica en profundidad cual es el problema propiamente dicho, como si lo hace la metodología propuesta en el presente trabajo de grado.

En la metodología propuesta se plantean distintos tipos de evaluaciones basados en diferentes escenarios. De esta forma, en el análisis total de riesgo de los 52 puentes se encontró que el 40% equivalente a 20 de los puentes analizados no tiene riesgo por socavación, 40% tiene un riesgo muy bajo, 12% equivalente a 6 puentes tienen un riesgo bajo y que 8% de los 52 puentes tiene un riesgo intermedio. Sin embargo cabe resaltar que de esta metodología se pueden obtener distintas calificaciones de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Es evidente que presenta una



evaluación mucho más detallada del análisis por socavación. Adicionalmente brinda la posibilidad de evaluar cuál de los factores es el que está teniendo una mayor incidencia a la hora de evaluar la socavación.

Otra ventaja del análisis detallado de la amenaza es que permite optimizar los recursos en la toma de decisiones, es decir es muy distinto por ejemplo evaluar un puente que haya obtenido una calificación elevada de riesgo por socavación en la cual se obtuvo una amenaza baja por erosión en la cuenca y alta por amenaza según el tipo de cauce. Este tipo de análisis detallado no solo facilita la toma de las decisiones y optimiza los recursos del Estado en el momento de la conservación de este tipo de estructuras, sino que también brinda un panorama general de cuál puede ser el problema principal y ofrece un enfoque más amplio para los interesados hacia encontrar la mejor solución desde el punto de vista beneficio -costo.

Es importante resaltar nuevamente el papel fundamental que cumple la implementación de la metodología en ArcGIS, se ve claramente como el análisis se ve potenciado a la hora de la toma de decisiones. Además tiene otras ventajas, la principal es el hecho que varios de los parámetros que involucra la evaluación de riesgo y priorización son parámetros dinámicos, este hecho es fundamental ya que constantemente el aplicativo se estará actualizando y arrojará calificaciones en tiempo “real”. Otra ventaja es que se puede realizar un análisis preliminar de riesgo y priorización parcial sin la necesidad de realizar la inspección visual, claro está que no es lo recomendable. Lo mencionado anteriormente puede ser utilizado por las distintas entidades para crear un cronograma de inspección priorizando la visita de los puentes que obtengan las puntuaciones más elevadas en esta primera etapa. De igual forma la metodología puede ser de gran ayuda a la hora de evaluar el riesgo por socavación en la etapa de diseño de un puente que atraviesa una corriente de agua ya que con las tres primeras etapas se puede tener una calificación preliminar del riesgo por socavación que puede ser complementada con la fase 4 de trabajos de campo.



- Como era de esperarse todos los puentes de la vía obtuvieron calificaciones de importancia media 40% y alta 60%. De la recopilación de datos y las dos visitas se detectó que la mayoría de los puentes de la vía Bogotá Villavicencio poseen cimentación profunda, el 58% de los puentes tiene pilas con cimentación profunda de los cuales solo el 62% tienen pilas. En el caso de los estribos el 69% de los puentes posee cimentación profunda. Este es uno de los factores determinantes a la hora de calificar la vulnerabilidad de los puentes y es por esta razón que la mayoría de los puentes tienen vulnerabilidades con calificaciones bajas.

Adicionalmente se aprecia que tan solo el 4% de los puentes de la vía han tenido problemas de socavación (puente Los Gaviones y la Marcelita), esto es evidencia que la socavación no es un fenómeno que esté afectando en gran medida los puentes de la vía. Se detectó que la principal causa para que no haya una marcada socavación a lo largo de los puentes de la vía es el hecho que la mayoría de los cauces que se atraviesan se encuentran encañones muy profundos como para afectar de algunas forma la estructura.

- De las distintas amenazas analizadas por la metodología, se puede evidenciar que hay amenazas altas generadas principalmente por la erosión en la cuenca. De esta fase obtenemos que el 10% de los puentes es decir 5 de los puentes se encuentran bajo una amenaza estos puentes son Los Gaviones, María Auxiliadora, Quebrada la Honda, la Quiña y Estaqueca, 11% de los puentes obtuvieron una calificación media, 10 % una amenaza baja, 27% una amenaza muy baja y 42% no tienen amenaza. Los puentes que no tienen amenaza son aquellos que no se encuentran sobre un paso de agua.

Finalmente de la combinación de las amenazas y la vulnerabilidad obtenemos riesgo, y de la combinación de riesgo con la importancia obtenemos priorización. De esta etapa obtenemos que solo el 2% de los puentes obtiene una prioridad alta, 14% una prioridad baja y el 42% una prioridad muy baja. El puente con la calificación alta es Los Gaviones, cabe aclarar que parte de la validación de la tesis fue el hecho de corroborar en las visitas que este puente, que anteriormente fue rehabilitado por socavación estaba nuevamente en proceso de rehabilitación.

- El programa ArcGIS demostró ser una valiosa herramienta para el análisis de las diversas variables planteadas para analizar la socavación, adicionalmente permite tener un panorama más amplio y ver en detalle los puntos críticos ya que debido a su esencia es una gran ayuda visual. En el caso de algunos de los mapas como lo son el de erosión y el de precipitación los mapas utilizados fueron digitalizados



ya que únicamente se consiguieron como imágenes. La mayoría de los mapas tipo shape se encuentran de forma gratuita en el IGAC sin embargo son difíciles de bajar.

- A pesar de que se recibió bastante ayuda por entidades como el INVIAS, la mayoría de las que poseen información no la otorgan de manera gratuita, además las que la tienen disponible no prestan el servicio adecuadamente. Debido a la magnitud de análisis de la tesis en algunos casos no se pudo contar con información más adecuada. Un claro ejemplo de esto es la fase 3: análisis de crisis invernal y precipitación. En esta fase se habría podido tener mucha más validez si en cambio de definir la precipitación como una variable se hubiera reemplazado por la intensidad horaria. De esta variable se pueden obtener una mayor cantidad de datos para el análisis hidrológico, así mismo este parámetro está más relacionado con las crecientes. Sin embargo debido a temas de presupuesto no fue posible comprar los registros de las estaciones para poder generar los mapas.
- Es importante resaltar que en la aplicación de la metodología las variables dinámicas como lo son la precipitación, crisis invernal, velocidad y hasta cierto punto las inspecciones se mantengan actualizadas.
- A la hora de realizar la inspección visual se debe contar con experiencia y manejo del tema para lo que se recomienda leer el instructivo planteado en 5.6.5 Definiciones y terminología de formato de campo.
- Como propuesta alternativa se podría realizar un análisis de redes en ArcGIS con el fin de determinar si existen vías alternas para conectar un punto con otro y de esta forma asignarle más pesos a aquellos puentes que sean los únicos existentes para conectar dos puntos.
- Al ser una metodología experimental de priorización en la cual se realizó una primera aproximación a la determinación de los pesos de cada una de las variables, el lector es libre de modificar estos pesos según crea conveniente, claro está que debe conservar al menos la estructura con el fin de validar su nueva propuesta.



8 Recomendaciones y trabajos futuros

- Como recomendación para trabajos futuros se sugiere realizar una recopilación completa de información relacionada con las zonas o puentes que se pretenden analizar verificando su disponibilidad y facilidad de acceso, esto facilita el direccionamiento de la investigación ya que en Colombia pocas veces se manejan bases de datos actualizadas o completas o en algunos casos están restringidas al público
- Se recomienda contar con el apoyo de concesiones viales en cuanto a la realización de inspecciones de campo, debido a que dichos procedimientos requieren procesos predefinidos para obtener los permisos y contar con el aval para la realización de las inspecciones
- Se recomienda la realización de inspecciones apoyados en profesionales que conozcan registros históricos de la zona o que posean tiempo trabajando en los lugares en donde se pretenda realizar el desarrollo de la metodología
- Se recomienda poseer conocimientos previos de manejo de software de sistemas de información geográfica, ya que esto sin duda es una de las herramientas que permite el análisis simplificado de las variables relacionadas con la socavación
- Se recomienda obtener las precipitaciones diarias de por lo menos un mes para seleccionar los promedios más altos y de esta manera realizar los análisis teniendo en cuenta las condiciones críticas que desencadenarían problemas de socavación en los puentes
- Se recomienda previo a cualquier trabajo de campo, leer los protocolos de seguridad y las normativas aplicables a esta, las inspecciones en puentes poseen algún grado de riesgo en su ejecución por lo tanto no se deben pasar por alto
- Para trabajos futuros, se puede plantear el módulo de instrumentación, que directamente esté conectado al SIG, para realizar un monitoreo continuo del estado del puente en tiempo real
- Para trabajos futuros, se puede plantear la implementación de toda la información de base y procesada en la metodología a un servidor web, de modo que esté disponible para su consulta a las entidades pertinentes.
- Para trabajos futuros, se puede plantear el ingreso de datos de los formularios de campo, directamente al servidor web, el cual almacene los registros, desde computadores en el sitio de la inspección o aplicaciones en celulares inteligentes a partir de conexión a internet



9 BIBLIOGRAFÍA

- INVIAS. (2009). *Base de datos - SIPUCOL*. Bogotá, Colombia: Proyecto Invias y Directorado de Carreteras de Dinamarca.
- (POA) U.S. Department of Transportation. (2006). *Plan of Action for Scour Critical Bridges*. United States: Federal Highway Administration.
- Acosta, C. (1987). *Socavación Local en Pilas de Puente y Diseño de Estructuras Protectoras. Proyecto de Grado, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia* .
- Aguas de Mérida. (2011). *Motivado a la fuertes precipitaciones*. Mérida, Venezuela: Unidad De Imagen Y Mercadeo.
- Alcaldía de Tibasosa. (2012). *Puente colapsa por la ola invernal en Tibasosa*. Tibasosa, Colombia: Tibasosa le informa.
- Ameneyro, A. A. (Et al. 2004). *Reingeniería para la implementación de un Web Feature Service*. Mexico: Universidad de las Américas Puebla.
- Austrroads. (1994). *Waterway Design – A Guide to the Hydraulic Design of Bridges, Culverts and Floodways*. Sydney, Australia.
- BBC News. (22 de Nov de 2009). *Cumbria flood bridges facing safety checks*. BBC .
- BBC News. (7 de Dec de 2009). *Cumbrian Floods 2009*.
- Bruce W. Melville, . E. (Et al. 2000). *Bridge Scour. Water Resources Publication, LLC , New Zeland*.
- Building Industry Authority. (1992). *New Zealand Building Code Handbook*. Wellington, New Zealand.
- CCDSP. (1995). *Colombia*. . Colombia: Ministerio de Transporte. Instituto Nacional de Vías.
- Chang, W. Y. (Et al. 2004). *Evolution on scour at circular bridge piers*. United States: Journal of Hydraulic Engineering.
- Chen, H.-L. E. (Et al. 2000). *Evaluation of scour and stream stability by using CAESAR*. Purdue University, Indiana, USA.
- Christopherson, R. W. (Et al. 2010). *Geosystems*. California, United States: Pearson Prentice Hall.
- Daily Mail Reporter. (2013). *Teen couple swept away by Colorado floodwaters brings death toll to eight with 600 still unaccounted*. Colorado, United States.
- Dargahi, B. (Et al. 1982). *Local scour at bridge piers - A review of theory*. Stockholm, Sweden: Hydraulics Laboratory, Royal Institute of Technology.
- Davis, E. R. (Et al. 2001). *EVALUATING SCOUR AT BRIDGES*. Washington, D.C. United States: Hydraulic Engineering Circular No. 18.
- Departamento de Edafología y Química Agrícola. (1998). *Erosión hídrica del suelo: factores*. Granada, España: Universidad de Granada.
- Diario Ariguani al día. (2013). *Invias Cerrara Parcialmente la Troncal de los Contenedores*. Ariguani , Colombia.



- Diario de Navarra. (2010). *El Gobierno de Navarra mantiene el nivel de preemergencias por inundaciones hasta este sábado*. Pamplona, España: Oficina de Prensa, Navarra.
- Diario El Comercio. (2012). *9 puentes de Portoviejo, en limpieza*. Portoviejo, Ecuador: Patricio Ramos.
- Diario El Nuevo Dia. (2012). *Peligrosos los niveles de ríos La Plata y Manatí*. Manatí, Puerto Rico: Raul Colon.
- Diario El Pais. (18 de Nov de 2013). El clima extremo cuesta 148.000 millones al año y va a más.
- Diario Prensa Libre. (2011). *Lluvia deja dos mil evacuados y cinco mil incomunicados en Honduras*. Colon, Honduras.
- Diario Pueblos America. (2010). *Puente del rio Salado*. Anáhuac, México.
- Diario Sin Futuro. (2011). *Se hunde el puente del Riopudío en Almensilla*. Sevilla, España: Jesus Rodriguez.
- Diario The Caravan. (2005). *Does anyone know the state of India's bridges?* India.
- Diario Vanguardia. (2012). Cuenta de cobro por ola invernal. *Bucaramanga, Colombia*.
- Faraday, R. C. (Et al. 1983). *Hydraulic Factors in Bridge Design*. Wallingford , United Kindom: Hydraulics Research Ltd.
- Federal Highway Administration. (1979). *Bridge Inspectors Training Manual*. Washington D. C., United States.
- Flechas. (1985). Estudio de la influencia del material granular sobre la socavación en pilares de puentes. *Proyecto de grado, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia* .
- Forest Services. (1998). *Bridge Scour Evaluation*. United States: Transportation Systems.
- Fukui, J. A. (Et al. 2000). *Development of the new Inspection Method on Scour Condition around Existing Bridge Foundations*. Tsukuba, Japan.
- Garcia, M. (2011). *Identificación de peligros y evaluación de riesgos en la F.I.M.E Poza Rica*. Veracruz: Universidad Veracruzana.
- GIECC. (2007). *Cambio climático - Informe de síntesis*. Geneva, Switzerland: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- González, G. D. (Et al. 1995). *Restauración de ríos y riveras*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Grijalva, F. J. (Et al. 2012). *Sistema De Rios Trenzados*. Mexico: Geologia Uson.
- Guevara, M. (1998). Socavación en puentes . *Universidad del Cauca, Popayan, Colombia*.
- I. Cantarino. (2001). *Principales Divisiones De Los Tiempos Geológicos*. Bilbao, España: Universidad de Valéncia.
- ICOPZA. (2012). *Topes Sísmicos*. Mexico D.F: Ingeniería, Construcción, Presfuerzo y Accesorios, SA DE CV.
- IDEAM. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá, Colombia: Centro de Documentación e Información Científico Técnica.



- INVIAS. (1996). Manual de inspección principal de Puentes. *Proyecto Invias y Directorado de Carreteras de Dinamarca, Bogotá, Colombia.*
- INVIAS. (2010). Trabajando por la prosperidad. *Bogotá, Colombia.*
- Javier Malaga. (2007). *Inundaciones Sept 07. Adios al puente.* España.
- Kattell, J. A. (Et al. 1998). Bridge Scout Evaluation; Screening, Analysis & Countermeasures. *Report prepare for the USDA Forest Services and Cooperating Federal and State agencies, United States.*
- Kelly, S. (1999). Underwater Inspection Criteria . *Naval Facilities Engineering Service Center, paper prepared for the California State Lands Commission, United States.*
- Lagasse, P. (2001). Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures - Experience, Selection, and Design Guidelines. *Hydraulic Engineering Circular No. 23 (HEC 23), Second Edition, FHWA NHI 01-003, Federal Highway Administration, Washington, D.C, United States.*
- Lu, J. H. (Et al. 2008). *Field Measurements and Simulation of Bridge Scour Depth Variations during Floods.* United States: Journal of Hydraulic Engineering.
- Márquez, L. L. (Et al. 2009). *Suelos dispersivos.* Barinas, Venezuela: Escuela de Ingeniería Civil.
- Maza, A. (Et al. 1967). *Notas del Curso sobre Hidráulica Fluvial.* Popayán, Colombia.: Universidad del Cauca.
- Melville, B. W. (Et al. 2001). *Bridge-Scour Screening Methodology for New Zealand Bridges.* New Zealand.: Transfund New Zealand Research.
- Mercado, E. A. (Et al. 2008). *The Pneumatic Scour Detection System.* Oakland, United States: Journal of Hydraulics Engineering, ASCE.
- Mesa, B. (Et al. 2009). *El Cambio Climatico en Colombia.* Bogotá, Colombia: Repositorio Institucional EDocUR - Universidad del Rosario.
- Missouri Water Science Center. (2013). *Local bridge scour.* Missouri, United States: USGS.
- Muñoz, E. (2012). *Ingenieria de Puentes Tomo II .* Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.
- Muñoz, E. (Et al. 2000). Estadística de las causas de falla de puentes en Colombia. *Apuntes de clase Ingeniería de puentes, Bogotá, Colombia, 14-15.*
- Muñoz, E. (Et al. 2001). Estudio de las causas del colapso de algunos puentes de Colombia. *Ingeniería y Universidad, Bogotá, Colombia.*
- Muñoz, E. V. (Et al. 2004). Estado y daños típicos de los puentes de la red vial nacional de Colombia, basados en inspecciones visuales. *Rutas, Numero 104 Septiembre - Octubre , España, 104.*
- Muñoz, E. Y. (Et al. 2004). Evaluación del estado de los puentes de acero de la red vial de Colombia. *Revista Internacional de desastres naturales e infraestructura civil, Volumen 4 No.2 Diciembre, Puerto Rico.*
- New Zealand Transport Agency. (2009). *The Development of a National Scour and Waterway Risk Screening Procedure for State Highway Bridges in New Zealand.* New Zealand.



- Noticia de Impacto. (2012). *La alerta amarilla en las ciudades de Arica y Punta Arenas*. Arica, Chile.
- Noticias Álava. (2013). *Vitoria actuará "de manera inmediata" en los ríos Errekaleor y Santo Tomás*. Albalá, España: EUROPA PRESS.
- Organización De Las Naciones Unidas. (2008). *Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático CMNUCC*. New York, Estados Unidos.
- OXFAM. (2011). *¿Cómo evitar otro desastre? Lecciones de la ola invernal en Colombia*. Bogotá, Colombia.
- P.F. Lagasse HEC-18, P. C.-O. (Et al. 2009). *Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection, and Design Guidance-Third Edition*. Washington, D.C, United States: Hydraulic Engineering Circular No. 23, Publication No. FHWA-NHI-09-111.
- Palmer, R. E. (Et al. 1997). *CAESAR: Catalog and Expert Evaluation on Scour Risk and River Stability at bridge Site. Report 426 National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)*. National Academy Press, Washington D.C.
- Parola, A. C. (Et al. 1992). *Stability of Riprap at Bridge Piers*. Washington, D.C., United States.: Journal of Hydraulic Engineering.
- PEÑA, C. (2012). *Ponen en cintura importación de maquinaria e insumos para minería (Radio Santafe)*. Bogotá, Colombia: Mundo Minero.
- Phillips, D. R. (Et al. 2005). *Scour and Arctic Marine Pipeline Workshop*. Mombetsu ,Japan: 13th International Okhotsk Sea and Sea Ice Symposium and Ice Scour and Arctic Marine Pipelines Workshop in Mombetsu.
- PNUD. (2009). *La agenda colombiana de adaptación al cambio climático* . Bogotá , Colombia: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Propia. (2013). *Inspeccion de Puentes via Bogotá-Villavicencio*. Villavicencio, Colombia.
- Raudkivi, A. J. (Et al. 1986). *Functional Trends of Scour at Bridge Piers*. New Zealand,: Journal of Hydraulic. Engineering.
- Raudkivi, A. J. (Et al. 1996). *Effects of Foundation Geometry on Bridge Pier Scour*. New Zealand: Journal of Hydraulic Engineering.
- Richardson, E. A. (Et al. 1999). *Stream Stability and Scour at Highway Bridges. Compendium of Stream Stability and Bridge Scour Papers presented at American Society of Civil Engineers Hydraulics Division Conferences 1991 to 1998, A.S.C.E.*
- Richardson, E. A. (Et al. 2000). *Evaluating Scour At Bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18 (HEC 18), Fourth Edition, FHWA NHI 01-001, Federal highway Administration, Washington D.C.*
- Scientific American. (2013). *Scour: Why Most Bridges Fail*. United States.
- Secretaria General del Senado de la República. (2011). *Decreto legislativo de desarrollo de estado de emergencia economica, social y ecologica*. Bogotá, Colombia.



- Sedano, A. P. (Et al. 2011). Desarrollo de Una Metodología para la Evaluación del Estado de Puentes Existentes. *Proyecto de grado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.*
- Sistema De Informacion Geografica Para La Planeacion Y El Ordenamiento Territorial . (2005). *SIGOT*. Bogota, Colombia.
- Sociedad Colombiana de Ingenieros. (1994). *Investigacion sobre las posibles causas del colapso del puente unete los angeles*. Bogotá, Colombia.
- Suárez, J. (2001). *Control de Erosion en Zonas Tropicales*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Turmero, I. (2007). *Sistema de Informacion Geografico*. Ciudad Guyana: Universidad experimental politecnica Antonio Jose de Sucre.
- U. S Department of Transportation. (1979). *Bridge Inspectors Training Manual*. Washington D. C.: Federal Highway Administration.
- UCA News. (2006). *El colapso de un puente histórico*. Corea del Sur.
- Universidad de los Andes. (2000). *Estudio del colapso del puente Unete*. Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de Vias.
- Universidad Nacional de Colombia. (1998). *Causas del colapso del puente Los Angeles*. Bogotá, Colombia: Instituto Nacional de Vias.
- University Of Toronto Press. (2004). *Bridge Hydraulics*. Toronto, Canada: Roads and Transportation Association of Canada.
- Wallingford. (2013). *A new way to assess the likelihood of scour risk on bridges*. United Kingdom.
- Welsen, C. V. (2009). *Introduccion a los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo*. Enschede, The Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Wolman, M. a. (Et al. 1957). *River Floodplains: Some Observations on their Formation*. Washigton, DC . United States: USGS Professional Paper 282-C. U.S. Geological Survey.
- Works Consultancy Services. (1990). *Wairoa bridge failure: Assessment of total costs* . Wellington, New Zealand: Report for Transit New Zealand.



Yo, *Edgar Eduardo Muñoz Díaz*, he revisado y aprobado la presente propuesta de trabajo de grado.

Firma

Fecha



ANEXOS

ANEXO 1
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
BIBLIOTECA ALFONSO BORRERO CABAL, S.J.
ENTREGA DE TESIS Y TRABAJOS DE GRADO

FACULTAD: Ingeniería
 PROGRAMA: Ingeniería civil
 FECHA DE ENTREGA: 27 de enero de 2014

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	TITULO DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO	NOMBRE DEL DIRECTOR	AÑO	Documentos adjuntos (Marque con X)		
					Anexo 2	Anexo 3	Carta de confidencialidad
Giraldo Arenas	German Andres	Propuesta metodológica para la evaluación de la susceptibilidad y socavación de puentes apoyada en un Sistema de Información Geográfico (SIG).	Edgar Muñoz	2014	X	X	
Vega Castillo	Daniel Enrique	Propuesta metodológica para la evaluación de la susceptibilidad y socavación de puentes apoyada en un Sistema de Información Geográfico (SIG).	Edgar Muñoz	2014	X	X	

DILIGENCIADO POR (Nombres y Apellidos): German Andrés Giraldo Arenas Daniel Enrique Vega Castillo
 CARGO: Estudiantes

FIRMA: *German G* *Daniel Vega C*



ANEXO 2

CARTA DE AUTORIZACIÓN DE LOS AUTORES
(Licencia de uso)

Bogotá, D.C., Enero 28 del 2014

Señores
Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J.
Pontificia Universidad Javeriana
Cuidad

Los suscritos:

German Andres Giraldo Arenas , con C.C. No 1019054544
Daniel Enrique Vega Castillo , con C.C. No 1032437846
 _____ , con C.C. No _____

En mi (nuestra) calidad de autor (es) exclusivo (s) de la obra titulada:
Propuesta metodológica para la evaluación de la susceptibilidad y socavación de puentes
 apoyada en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

(por favor señale con una "x" las opciones que apliquen)
 Tesis doctoral Trabajo de grado Premio o distinción: Si No

cual: _____
 presentado y aprobado en el año 2014 , por medio del presente escrito autorizo (autorizamos) a la Pontificia Universidad Javeriana para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mi (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autorizan a la Pontificia Universidad Javeriana, a los usuarios de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J., así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado un convenio, son:

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La conservación de los ejemplares necesarios en la sala de tesis y trabajos de grado de la Biblioteca.		X
2. La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca)	X	
3. La consulta electrónica - on line (a través del catálogo Biblos y el Repositorio Institucional)	X	
4. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer	X	
5. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet	X	
6. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previo convenio perfeccionado con la Pontificia Universidad Javeriana para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de



acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

De manera complementaria, garantizo (garantizamos) en mi (nuestra) calidad de estudiante (s) y por ende autor (es) exclusivo (s), que la Tesis o Trabajo de Grado en cuestión, es producto de mi (nuestra) plena autoría, de mi (nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy (somos) el (los) único (s) titular (es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mi (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Pontificia Universidad Javeriana por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaremos (continuiremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Pontificia Universidad Javeriana está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: Información Confidencial:

Esta Tesis o Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de una investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. Si No

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

NOMBRE COMPLETO	No. del documento de identidad	FIRMA
German Andres Giraldo Arenas	1019054544	<i>German Giraldo Arenas</i>
Daniel Enrique Vega Castillo	1032437846	<i>Daniel Vega Castillo</i>

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO: Ingeniería Civil



ANEXO 3
BIBLIOTECA ALFONSO BORRERO CABAL, S.J.
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO
FORMULARIO

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS DOCTORAL O TRABAJO DE GRADO Propuesta metodológica para la evaluación de la susceptibilidad y socavación de puentes apoyada en un Sistema de Información Geográfico (SIG).						
SUBTÍTULO, SI LO TIENE						
AUTOR O AUTORES						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
Giraldo Arenas			German Andrés			
Vega Castillo			Daniel Enrique			
DIRECTOR (ES) TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
Muñoz Díaz			Edgar Eduardo			
FACULTAD						
Ingeniería						
PROGRAMA ACADÉMICO						
Tipo de programa (seleccione con "x")						
Pregrado	Especialización	Maestría	Doctorado			
X						
Nombre del programa académico						
Ingeniería Civil						
Nombres y apellidos del director del programa académico						
María Patricia León Neira						
TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:						
Ingeniero Civil						
PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):						
CIUDAD		AÑO DE PRESENTACIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO		NÚMERO DE PÁGINAS		
Bogota D.C		2014		196		
TIPO DE ILUSTRACIONES (seleccione con "x")						
Dibujos	Pinturas	Tablas, gráficos y diagramas	Planos	Mapas	Fotografías	Partituras
		x		x	X	
SOFTWARE REQUERIDO O ESPECIALIZADO PARA LA LECTURA DEL DOCUMENTO						
Nota: En caso de que el software (programa especializado requerido) no se encuentre licenciado por la Universidad a través de la Biblioteca (previa consulta al estudiante), el texto de la Tesis o Trabajo de Grado quedará solamente en formato PDF.						



MATERIAL ACOMPAÑANTE					
TIPO	DURACIÓN (minutos)	CANTIDAD	FORMATO		
			CD	DVD	Otro ¿Cuál?
Vídeo					
Audio					
Multimedia					
Producción electrónica					
Otro Cuál?					
DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL E INGLÉS					
Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. (En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Sección de Desarrollo de Colecciones de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J en el correo biblioteca@javeriana.edu.co , donde se le orientará).					
ESPAÑOL			INGLÉS		
Socavación			Scour		
Metodología			Methodology		
Priorización			Prioritization		
Puentes			Bridges		
Inspección visual			Visual inspection		
RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS (Máximo 250 palabras - 1530 caracteres)					
<p>Resumen Se creó de una metodología para la priorización del riesgo ante la socavación en los puentes de Colombia, apoyados en un sistema de información geográfica ArcGIS v10 2. Para su desarrollo se realizó una exhaustiva investigación de antecedentes y marco teórico principalmente enfocado en metodologías para la priorización y análisis de riesgo por socavación. Para el caso particular de este trabajo de grado se propone una metodología que consta de seis 6 fases principales, de las cuales por motivos de alcance se desarrollaran únicamente las primeras cuatro 4, las cuales son:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fase 1 Importancia y vulnerabilidad preliminar • Fase 2 Factores de erosión geología y tipo del suelo • Fase 3 Factores climáticos y tipo de cuenca • Fase 4 Labores de campo • Priorización <p>Con el fin de validar la metodología, se realizaron dos visitas de inspección visual en puentes localizados en la vía Bogotá Villavicencio, se obtuvieron resultados satisfactorios ya que se logró corroborar con las calificaciones de las inspecciones de SIPUCOL y la metodología propuesta. Adicionalmente, el ArcGIS demostró ser de gran utilidad a la hora involucrar los conceptos de amenaza riesgo y vulnerabilidad, esto es debido a que permite generar todo tipo de mapas correlacionando los datos y la información implementada.</p> <p>Abstract It was created a methodology for prioritization of risk for scour at bridges in Colombia, supported by a geographic information system ArcGIS v10 2. To develop a thorough background investigation and theoretical framework mainly focused on methodologies for prioritization and risk analysis was performed by scour. For the particular case of this degree work a methodology consisting of six 6 main phases, which for reasons of scope to develop only the first four 4 which are proposed:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Phase 1 Significance and preliminary vulnerability • Phase 2 Factors erosion geology and soil type • Phase 3 Climatic factors and type of basin • Phase 4 Field Work • Prioritization <p>In order to validate the methodology, two visits by visual inspection located in the Bogota Villavicencio bridges were made; satisfactory results were achieved as corroborated with ratings SIPUCOL inspections and the proposed methodology. Additionally, the ArcGIS proved useful when the concepts of threat involve risk and vulnerability, this is because they can generate all kinds of correlating data and information maps implemented.</p>					



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA**

DATOS COMPLEMENTARIOS

Apreciado autor:

Su artículo será catalogado de acuerdo con la clasificación de contribuciones del Sistema de Indexación Permanente de Colciencias. El artículo será enviado a revisión por parte de pares académicos y oportunamente les informaremos del resultado de dicha evaluación.

Con el objeto de completar el diligenciamiento de la ficha de registro atentamente le solicito el reporte de la información que a continuación se relaciona. El envío de esta información no supedita la evaluación por parte de los pares académicos.

- Institución de pertenencia del (los) autor(es): Pontificia Universidad Javeriana
- Dirección: KR 7 # 40-62
- Teléfono: (1) 3208320
- Fax: (1) 3208320
- Correo electrónico: daniel.vega.ing@hotmail.com
- Grupo de investigación al cual pertenece(n) el (los) autor(es) (en caso de existir): Grupo de investigación de estructuras y construcción
- La contribución es resultado de un proyecto de investigación: Si No
- Nombre del proyecto de investigación del cual se deriva el artículo: (debe enviarnos el número de registro del proyecto de investigación):
- Tema de la investigación: Propuesta metodológica para la evaluación de la susceptibilidad y socavación de puentes apoyada en un Sistema de Información Geográfico (SIG).
- Programa de investigación de Colciencias en el que se enmarca:
- Institución o instituciones ejecutantes: Pontificia Universidad Javeriana
- Duración de la investigación: 1 año
- Fase de la investigación a la que corresponde el artículo: Final
- Descripción de la investigación: Se creó de una metodología para la priorización del riesgo ante la socavación en los puentes de Colombia, apoyados en un sistema de información geográfica ArcGIS v10.2.
- Entidades financiadoras de la investigación: Pontificia Universidad Javeriana
- Monto de la financiación de la investigación: \$ 1'260.000

Calle 40 # 5-40 Edificio José Gabriel Maldonado, S.J. Piso 2 Teléfonos 3 20 83 20 ext. 5346
Fax 3 20 81 55 / 2 88 79 69 - visite nuestro homepage:
<http://ingenieriayuniversidad.javeriana.edu.co>



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA**

INFORMACIÓN DE AUTOR

Nombres: Daniel Enrique		Apellidos: Vega Castillo	
Cargo Actual: Estudiante			
Afilación institucional: Pontificia universidad Javeriana			
Dirección: Cra 9ª # 96 - 36		Teléfono: 6169484	
Pagina web:			
FORMACIÓN ACADÉMICA			
Pregrado	Título: -	Institución: -	Año:-
Especialización	Título: -	Institución: -	Año:-
Maestría	Título: -	Institución: -	Año:-
Doctorado	Título: -	Institución: -	Año:-
Áreas de interés: Ingeniería civil, con énfasis en construcción y diseño Metodologías de inspección de puentes			
C1. Sin publicaciones			



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERIA**

INFORMACIÓN DE AUTOR

Nombres: German Andres		Apellidos: Giraldo Arenas	
Cargo Actual: Estudiante			
Afilación institucional: Pontificia universidad Javeriana			
Dirección: Calle 127 A # 71B - 89		Teléfono: 320 8487990	
Pagina web:			
FORMACIÓN ACADÉMICA			
Pregrado	Título: -	Institución: -	Año:-
Especialización	Título: -	Institución: -	Año:-
Maestría	Título: -	Institución: -	Año:-
Doctorado	Título: -	Institución: -	Año:-
Áreas de interés: Ingeniería civil, con énfasis en construcción y diseño Metodologías de inspección de puentes			
C1. Sin publicaciones			