

**ESTADO DEL ARTE DE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN
PAÍSES DE LATINOAMÉRICA PARA EVALUAR EL RIESGO, LA AMENAZA Y
VULNERABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL.**

**ANDREA JULIETH BENITEZ GÓMEZ
DIANA MARCELA DALLOS MARTÍNEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**ESTADO DEL ARTE DE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN
PAÍSES DE LATINOAMÉRICA PARA EVALUAR EL RIESGO, LA AMENAZA Y
VULNERABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL.**

**ANDREA JULIETH BENITEZ GÓMEZ
DIANA MARCELA DALLOS MARTÍNEZ**

**Proyecto de grado en Modalidad de Investigación para optar el título de
Ingeniero Civil.**

**DIRECTOR
Ms.C YERLY FABIAN MARTINEZ ESTUPIÑAN
MSc (c) en Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de grado primero que todo a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes y experiencias; A mis padres, Martin Benitez Moreno y Sonia Paulina Gómez Durán por ser mi motor, por apoyarme en todo momento, por su motivación constante y por todo el esfuerzo que han hecho para que esté culminando esta etapa de mi vida. A mis hermanos Anderson J. Benitez Gómez y Martin J. Benitez Gómez por ser parte importante de mi existencia y a Miguel Ángel Mateus Becerra por su comprensión, paciencia y amor incondicional.

Andrea Julieth Benitez Gómez

Le dedico primeramente mi trabajo a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

De igual forma, dedico este triunfo a mis padres Nevardo de Jesús Dallos Dallos y María Helena Martínez Rosas, por apoyarme en cada momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien y por su amor. A mi hermano Néstor Fabián Dallos Martínez quien adoro profundamente.

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer su amistad, apoyo, ánimo, y compañía en las diferentes etapas de mi vida en especial a Héctor Leonardo González León quien con su comprensión, amor y colaboración fue una parte muy importante en la realización de este proyecto.

Diana Marcela Dallos Martínez

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta investigación, agradecemos a Dios por bendecirnos para llegar hasta este punto, por iluminarnos y fortalecer nuestro espíritu para emprender el camino hacia el éxito. Agradecemos a nuestro director, el ingeniero MSc (c) Yerly Fabián Martínez Estupiñan por todo el apoyo brindado, por su calidad humana y su capacidad para guiar nuestras ideas en la realización de este proyecto. A los Ingenieros PhD. Hernán Porras Díaz, PhD. Jhon Jairo Cáceres Jiménez, Ing. Álvaro Efrén Díaz Sedano, Ing. German García Vera, PhD. Guillermo Mejía Aguilar; por su objetividad, disposición y solidaridad para determinar el camino más adecuado en la elaboración del proceso investigativo que hoy culmina.

Finalmente el agradecimiento más profundo y sentido para nuestras familias, por ser el pilar fundamental en todo lo que somos, por su apoyo incondicional a través del tiempo, por su ejemplo de lucha y honestidad.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. GENERALIDADES.....	18
2. METODOLOGÍAS.....	19
2.1 METODOLOGÍA 1.....	19
2.1.1 Parámetros.....	20
2.1.2 Desarrollo de la Metodología.....	20
2.2. METODOLOGÍA 2.....	23
2.2.1 Parámetros.....	24
2.2.2 Desarrollo de la Metodología.....	24
2.3 METODOLOGÍA 3.....	25
2.3.1 Parámetros.....	26
2.3.2 Desarrollo de la Metodología.....	26
2.4 METODOLOGÍA 4.....	30
2.4.1 Desarrollo de la Metodología.....	31
2.5 METODOLOGÍA 5.....	40
2.5.1 Parámetros.....	41
2.5.2. Desarrollo de la Metodología.....	41
2.6 METODOLOGÍA 6.....	57
2.6.1 Parámetros.....	58
2.6.2 Desarrollo de la Metodología.....	58
3. ANÁLISIS COMPARATIVO.....	67
3.1 ELEMENTOS DE CLASIFICACIÓN.....	67
3.2 OBSERVACIONES.....	67
4. CONCLUSIONES.....	69

REFERENCIAS	71
BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXOS	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Ranking mundial de la Calidad de infraestructura vial.	16
Tabla 2.	Vulnerabilidad a la influencia de los peligros estudiados. [7]	21
Tabla 3.	Rangos de Vulnerabilidad Estructural [8].....	22
Tabla 4.	Rangos de susceptibilidad a deslizamiento para cada geología.....	28
Tabla 5.	Resultados de los factores utilizados en la metodología de Kanji	30
Tabla 6.	Propiedades paramétricas del modelo geotécnico Varablanca [13]	32
Tabla 7.	Ecuaciones y correlación asociada a los factores de seguridad [16].....	37
Tabla 8.	Rangos de FS y criterios de vulnerabilidad [17]	38
Tabla 9.	Forma en perfil de la ladera [23]	43
Tabla 10.	Perfil de meteorización según diversos autores.....	48
Tabla 11.	Rangos de susceptibilidad calculados para la metodología [26]	50
Tabla 12.	Rangos establecidos para el detonante de deslizamientos superficiales. [28]	51
Tabla 13.	Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos según lluvia evento. [29]	52
Tabla 14.	Rangos establecidos para el detonante de deslizamientos profundos. . [30] .	52
Tabla 15.	Matriz de Riesgo Cualitativo [31]	56
Tabla 16.	Probabilidad Anual de Ocurrencia dado el Valor de Amenaza [32].....	57
Tabla 17.	Información a obtener con el Mapa Parlante [34]	60
Tabla 18.	Matriz de medida de mitigación	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas en función del costo por las que puede pasar un tramo de la carretera. [10].....	25
Figura 2. Área deslizada contra pendiente para cada unidad geológica	27
Figura 3. Resultados de los factores utilizados en la metodología de Kanji	29
Figura 4. Variación de la resistencia normalizada (c/γ) con la altura de falla para el modelo de Talud infinito	34
Figura 5. Modelo simplificado de terrazas	35
Figura 6. Vulnerabilidad geométrica de los rellenos en condición drenada. [19]..	39
Figura 7. Vulnerabilidad geométrica de los rellenos en condición no drenada. [20]	40
Figura 8. Variación de la forma en planta [22]	42
Figura 9. Factores de peso para la pendiente [25].....	44

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.	Formato de presentación de información de tipo matriz	77
Anexo B.	Niveles de Vulnerabilidad a las Amenazas Naturales	78
Anexo C	Descripción de la metodología propuesta para evaluación de las curvas de vulnerabilidad económica por lluvia	79
Anexo D	Esquema de la metodología del ángulo crítico	80
Anexo E	Esquema de la metodología de flujos de lodo basada en Kanji	81
Anexo F	Metodología de la Investigación	82
Anexo G	Escala sugerida de probabilidades para la magnitud o intensidad de un deslizamiento	83
Anexo H	Cuadro comparativo de las metodologías estudiadas.	84
Anexo I	Ventajas y Desventajas de cada una de las metodologías estudiadas .	85

RESUMEN

TÍTULO:

ESTADO DEL ARTE DE LAS DIFERENTES METODOLOGÍAS UTILIZADAS EN PAÍSES DE LATINOAMÉRICA PARA EVALUAR EL RIESGO, LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL*

AUTOR(ES):

Andrea Julieth Benitez Gómez
Diana Marcela Dallos Martínez**

PALABRAS CLAVES: Infraestructura vial, Metodologías, Riesgo, Amenaza, Vulnerabilidad.

DESCRIPCIÓN:

Algunos países del mundo presentan dificultades a la hora de enfrentar problemas relacionados con el deterioro y el mal estado de la infraestructura vial rural especialmente cuando estos problemas están relacionados con factores ligados a desastres naturales como lo pueden ser fenómenos de remoción en masa, sismos, inundaciones, entre otros. Es por eso que se han desarrollado algunas metodologías que permiten evaluar el riesgo, la amenaza y la vulnerabilidad de dicha infraestructura ante estos fenómenos naturales. Sin embargo, en un país como Colombia no existen las suficientes alternativas para brindar una solución que abarque esta problemática de manera significativa, esto muy ligado a la misma topografía y accidentes naturales tan característicos de nuestra geografía. Además, Colombia actualmente es uno de los países Latinoamericanos más atrasados en materia de infraestructura vial, esto sumado a bajos índices de inversión y los diferentes fenómenos climáticos que afectan a los diferentes corredores viales en el país. Teniendo en cuenta lo anterior y analizando algunos factores tales como el incremento de la población, el cambio climático y el uso considerado de las vías surge la necesidad de investigar y recopilar las metodologías existentes en algunos países de Latinoamérica para brindar un apoyo y contribuir en la mitigación de riesgos de la infraestructura vial permitiendo dar aviso sobre posibles problemas presentes en las diferentes vías y así mitigar el impacto de esta problemática. Esta investigación tiene como objetivo principal realizar el análisis acerca de los diferentes factores involucrados en las metodologías encontradas y establecer la influencia que estos tienen en la predicción y disminución de riesgos para mantener el buen estado de las vías.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: MARTINEZ Estupiñan Yerly Fabian. MSc (c) en Ingeniería Civil

ABSTRACT

TITLE: STATE OF THE ART OF DIFFERENT METHODOLOGIES USED IN LATIN AMERICAN COUNTRIES FOR ASSESSING RISK, THREAT, AND VULNERABILITY OF ROAD INFRASTRUCTURE *

AUTHOR (S):

Andrea Julieth Benitez Gomez

Diana Marcela Dallos Martinez **

KEYWORDS:

Road Infrastructure, Methodologies, Risk, Threat, Vulnerability.

DESCRIPTION:

Some countries in the world have difficulties to face problems related to the deterioration and poor rural road infrastructure especially when these problems are related to factors linked to natural disasters such as some phenomena of landslides, earthquakes, floods, among others. That is why we have developed some methodologies to assess risk, threat and vulnerability of such infrastructure to these natural phenomena. However, in a country like Colombia there are no alternatives sufficient to provide a solution that covers this problem significantly, this being closely linked to the same topography and natural features so characteristic of our country. In addition, Colombia is now one of the most underdeveloped countries in Latin America in road infrastructure, this combined with low rates of investment and different weather events affecting different road corridors in the country. Considering the above and considering factors such as population growth, climate change and the use of roads considered the need to investigate and compile existing methodologies in some Latin American countries to provide support and contribute to the risk mitigation in road infrastructure allowing to give notice of potential problems that are present in different ways and to mitigate the impact of this problem. This research has as main objective the analysis about the different factors involved in the methodologies found and to establish the influence that they have on the prediction and risk reduction to maintain the good condition of the roads.

* Degree draft

** Faculty of Physics and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: MARTINEZ Estupiñan Yerly Fabian. MSc (c) in Civil Engineering

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial es primordial en nuestra vida tanto en situaciones cotidianas como durante eventos peligrosos y desastres, además, es un asunto transversal al crecimiento económico, al turismo y el desarrollo social de las comunidades y el mismo bienestar ciudadano.

Colombia actualmente es uno de los países Latinoamericanos más atrasados en materia de infraestructura vial, según el informe presentado por Fedesarrollo en el marco de la décima versión del Congreso Nacional de Infraestructura [1]. Por ejemplo Chile, que ocupa el puesto 23 en el Ranking mundial de Calidad de la Infraestructura vial con una calificación de 5.6, en comparación con Colombia que ocupa el puesto 126 con una calificación de apenas 2.6 [2].

Tabla 1. Ranking mundial de la Calidad de infraestructura vial.

Ranking Calidad Infraestructura Vial		
País	Rank	Calificación
Francia	1	6,5
Chile	23	5,6
Panamá	49	4,5
México	50	4,5
Ecuador	53	4,4
Perú	100	3,11
Bolivia	101	3,1
Argentina	106	3
Brasil	123	2,7
Colombia	126	2,6

Fuente: Sectorial, Portal Financiero, económico y empresarial. www.sectorial.co (Mayo de 2014).

La principal causa de esto es que el país está ubicado sobre la cordillera de los Andes, haciendo probable la presencia de fallas geológicas que conllevan al deterioro de la infraestructura vial, esto se debe principalmente a la existencia de

montañas geológicamente jóvenes, numerosos deslizamientos, Trazados a media ladera bordeando las montañas y/o paralelos a los ríos, Saturación de los suelos por efectos del incremento en la intensidad y frecuencia de las lluvias, Deforestaciones , e inadecuado uso de las fuentes hídricas, además con respecto a lo que correspondería a un país con sus características y hablando de carreteras, Colombia está un 30% **[3]** debajo del nivel en que debería estar, sumado a bajos índices de inversión, junto a los diferentes fenómenos climáticos.

1. GENERALIDADES

Existen una serie de factores que se deben estudiar para garantizar que la infraestructura vial se encuentre en condiciones favorables que permitan el fácil acceso a cualquier población.

El primero de estos es el riesgo, que se define básicamente como la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas [4]; Los factores que lo componen son la amenaza que es un fenómeno o condición peligrosa que puede ocasionar la muerte, daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, o daños ambientales; y la vulnerabilidad que simplemente es la susceptibilidad de una unidad social (familias, comunidad, sociedad) o estructura física, de sufrir daños por acción de un peligro o amenaza[4]. Dicha vulnerabilidad es explicada por el grado de exposición de la unidad social a la amenaza o peligro; por fragilidad, es decir la resistencia y nivel de protección frente al impacto de un peligro o amenaza y la resiliencia que es el nivel de asimilación o capacidad de recuperación de la unidad social afectada por la amenaza una vez ocurrida.

2. METODOLOGÍAS

La infraestructura vial es de gran importancia para el desarrollo de la economía en cualquier parte del mundo.

En América Latina y el Caribe, el transporte por carretera constituye el 80% del total del transporte de pasajeros y más del 60% del transporte de carga. Adicionalmente, se estima que el gasto en carreteras representa entre un 5% y un 10% del total de gastos de un gobierno y puede alcanzar hasta el 20% del presupuesto nacional [5]. En términos del valor de sus activos, las carreteras están por encima de otras formas de transporte como los ferrocarriles y las aerolíneas. La construcción y mantenimiento de las mismas generan además grandes cantidades de empleo [5]. Por esta razón se han propuesto varias metodologías con el fin de facilitar la evaluación del riesgo, la amenaza y vulnerabilidad de la infraestructura vial rural.

2.1 METODOLOGÍA 1.

Estudio General sobre los Tramos Vulnerables a los Peligros Naturales de la Carretera Panamericana y sus Corredores Complementarios en Centroamérica.

Esta metodología fue aplicada en países de Centroamérica como Panamá, Honduras, Nicaragua, Guatemala, Costa Rica y El Salvador en el año 2001 con el objetivo de reducir la vulnerabilidad de las carreteras a los peligros naturales, mediante programas de construcción, reconstrucción, mantenimiento y reparación vial, a través del desarrollo y difusión del programa PerfilMap que consiste en un sistema de computación basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permite sobreponer información de peligros naturales en la infraestructura vial, generando perfiles de vulnerabilidad. [6]

2.1.1 Parámetros

Los parámetros utilizados para desarrollar la metodología son:

- Geotecnia
- Geomorfología
- Hidrogeología
- Sismología
- Climatología

2.1.2 Desarrollo de la Metodología

Vulnerabilidad a los peligros naturales de la Carretera Panamericana

Con el fin de organizar la información relacionada con la vulnerabilidad a los peligros naturales de la Carretera Panamericana y sus corredores complementarios, la UDSMA diseñó un formato de presentación de información de tipo matriz la cual fue denominada formato OEA–UDSOT. La información técnica que contiene este formato es la siguiente: (Ver anexo A)

Para el análisis del perfil de vulnerabilidad, se trabaja con mapas de amenazas volcánicas, inundaciones, deslizamientos, y sismicidad. De igual forma se trabaja con los inventarios de drenajes de los tramos de carretera en estudio, así como datos de suelos y estudios de tráfico.

Para el desarrollo de esta metodología se evalúa la vulnerabilidad tanto estructural como no estructural.

- **Vulnerabilidad no estructural**

La metodología enfocada hacia la vulnerabilidad no estructural es la adaptada para desarrollar mapas temáticos sobre tramos vulnerables a peligros naturales de la Carretera Panamericana, para determinar los segmentos de carretera vulnerables. En estos mapas se representan diferentes niveles de vulnerabilidad a peligros naturales tales como amenazas volcánicas, deslizamientos, sismos, e inundaciones, en el área de influencia de la Carretera Panamericana.

El método que se aplica permite una aproximación del nivel de vulnerabilidad de un determinado territorio y su distribución espacio-temporal. La valoración de la vulnerabilidad de influencia (V_{inf}) se determina mediante la siguiente ecuación:

$$V_{inf} = \{(Av * Ad)\} * \frac{1}{2} (As + Ai) * Ir * \delta$$

En donde:

V_{inf} : Vulnerabilidad de la influencia = ($0 \leq V \leq 1$)

Av : Amenaza volcánica

Ad : Amenaza por deslizamiento

As : Amenaza por sismicidad

Ai : Amenaza por inundaciones

Ir : Índice relativo de la pobreza

δ : Delta, Factor de normalización, 1/192

Se considera que As y Ai son los factores que mayormente inciden al definir el grado de vulnerabilidad no estructural, según esta metodología.

- ✓ Cuando todos los factores sean iguales a 1, la vulnerabilidad de influencia será, $V_{inf} = 0,005$.
- ✓ Cuando todos los factores son iguales a 4, $V_{inf} = 1,00$.

Tabla 2. Vulnerabilidad a la influencia de los peligros estudiados. [7]

Vulnerabilidad de Influencia	Rango	Ponderación
Moderado	$V < 0.25$	1
Medio	$0.25 > V < 0.50$	2
Alto	$0.56 > V < 0.75$	3
Muy Alto	$0.76 > V < 1.00$	4

Fuente: Perfil de Vulnerabilidad de la carretera Panamericana Nicaragua, 2000

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores se realizan los mapas temáticos sobre amenazas naturales, identificando las zonas vulnerables Se asignan los niveles 1, 2, 3, y 4 para determinar el grado de vulnerabilidad.

Niveles de Vulnerabilidad a las Amenazas Naturales. (Ver anexo B)

- **Vulnerabilidad estructural**

En la metodología utilizada para definir la vulnerabilidad estructural se recopila información histórica en instituciones, universidades y poblaciones del área de influencia de la carretera. También se recopila información de entrevistas realizadas a los ingenieros responsables de proyectos de reconstrucción. Posteriormente se realizan giras de campo, para las cuales se cuenta con Sistemas de Posición Geográfica manuales, cámaras digitales y mapas geodésicos a escalas 1:50,000, para constatar y complementar la información obtenida de los mapas sobre peligros naturales, que luego se analizan y sintetizan para efectos del perfil de vulnerabilidad.

Tabla 3. Rangos de Vulnerabilidad Estructural [8]

Vulnerabilidad Estructural	Rango	Ponderación
Moderado	$V < 400$	1
Medio	$401 > V < 1600$	2
Alto	$1601 > V < 3600$	3
Muy Alto	$3601 > V < 6400$	4

Fuente: Perfil de Vulnerabilidad de la carretera Panamericana Nicaragua, 2000

Ejemplo:

Tramo afectado por inundaciones:

Longitud afectada del tramo corresponde a: 25% Vulnerabilidad Moderada (1), 50%: Media (2), 10%: Alta (3), 15%: Muy Alta (4) Densidad de Población: Alta, es decir, = 3

Aplicando la ecuación de ponderación se tiene que:

$$V = (1 * 25\% + 2 * 50\% + 3 * 10\% + 4 * 15\%) * 3 = 645$$

Haciendo uso de esta metodología y con base en los datos de la tabla 3, la vulnerabilidad estructural por inundación para el tramo es igual a 2, o sea, media, ya que 645 está en el rango comprendido entre 401 y 1600.

2.2. METODOLOGÍA 2

Metodología para estimación de curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial – aplicación carretera Bogotá - Villavicencio (Colombia)

Esta metodología fue aplicada en Colombia en el año 2007. La metodología fue implementada en la vía Bogotá – Villavicencio, que es una de las más importantes en Colombia por ser corredor de intercambio de productos agroindustriales y manufacturados entre el centro de Colombia y los Llanos Orientales.

En Colombia y seguramente en muchas partes del mundo, no existen curvas de vulnerabilidad económica por lluvias para carreteras, siendo el interés de la presente investigación mostrar tanto una metodología para la obtención de las

mismas así como también las primeras curvas en la región. Se evaluaron tanto las curvas de vulnerabilidad como el riesgo para diversos tramos de la carretera. [9]

2.2.1 Parámetros

El parámetro utilizado para el desarrollo de la metodología fue la asignación de precipitación por tramos de la carretera.

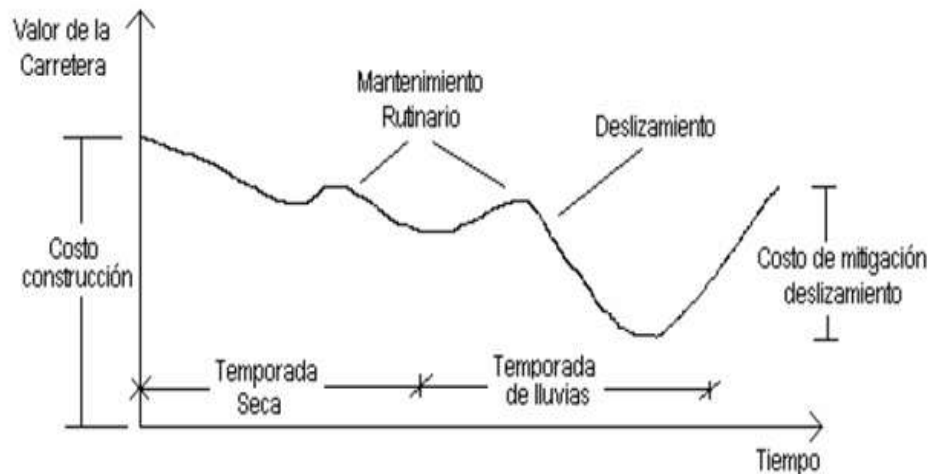
2.2.2 Desarrollo de la Metodología

Una curva de vulnerabilidad permite evaluar el riesgo económico cuando se integra con la amenaza por lluvia. Se menciona que ésta debería ser una herramienta dinámica en el tiempo, ya que las curvas de vulnerabilidad económica permitirían saber si las gestiones realizadas por las entidades encargadas del mantenimiento de la carretera están obteniendo resultados satisfactorios en su administración por la disminución en éste indicador.

La amenaza o curva de frecuencias de diversos niveles de lluvia en una zona puede determinarse siguiendo los métodos disponibles en Hidrología.

En la Figura 1 se muestran de forma cualitativa y esquemática las diferentes etapas por las que puede pasar un tramo de carretera en función del tiempo, relacionado con el valor de la carretera.

Figura 1. Etapas en función del costo por las que puede pasar un tramo de la carretera. [10]



Fuente: Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 7(1).

Descripción de la metodología propuesta para evaluación de las curvas de vulnerabilidad económica por lluvia. (Ver anexo C)

2.3 METODOLOGÍA 3

Análisis de la vulnerabilidad física y amenazas en la carretera longitudinal del norte en las microrregiones de Metapan y Alto Lempa. Región Norte, El Salvador

Esta metodología fue aplicada en el año de 2007 en El Salvador. La metodología utilizada para la elaboración de perfiles de vulnerabilidad de la carretera en estudio, combina el análisis de susceptibilidad a deslizamientos y la susceptibilidad a flujos de lodos y detritos. [11]

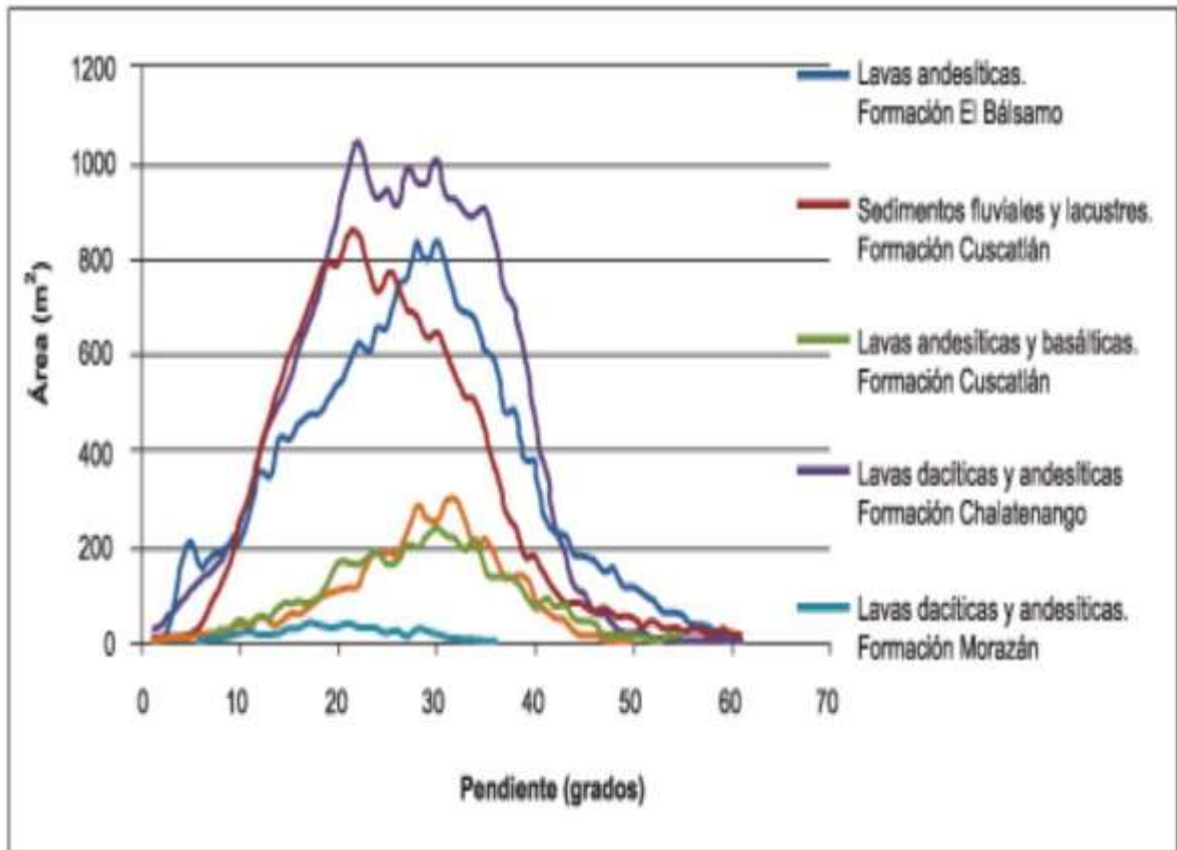
2.3.1 Parámetros. Los parámetros utilizados en el desarrollo de esta metodología son:

- Clima
- Sismicidad
- Deslizamientos

2.3.2 Desarrollo de la Metodología. El trabajo se fundamenta en la aplicación de dos metodologías desarrolladas y aplicadas por el LanammeUCR (Laboratorio nacional de materiales y modelos estructurales de la Universidad de Costa Rica) en carreteras de montañas, evaluando en una de ellas la susceptibilidad a deslizamientos de los suelos, basada en la obtención del ángulo crítico a través del ángulo promedio de la pendiente y su desviación estándar en las áreas deslizadas o propensas a deslizamientos. **(Ver anexo D)** La segunda metodología, evalúa la susceptibilidad de la carretera ante flujos de lodos y detritos, basándose en la metodología de Kanji que considera la existencia o combinación de factores tales que influyen de tal manera en la activación de este tipo de evento. **(Ver anexo E)**

El análisis de comportamiento del área deslizada se realiza con respecto a la pendiente para cada geología como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Área deslizada contra pendiente para cada unidad geológica



Fuente: Rev. Infraestructura vial, Vol. 10 (#19), 2008, Universidad de Costa Rica.

Área deslizada contra pendiente para cada unidad geológica y sus respectivos resultados se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 4. Rangos de susceptibilidad a deslizamiento para cada geología

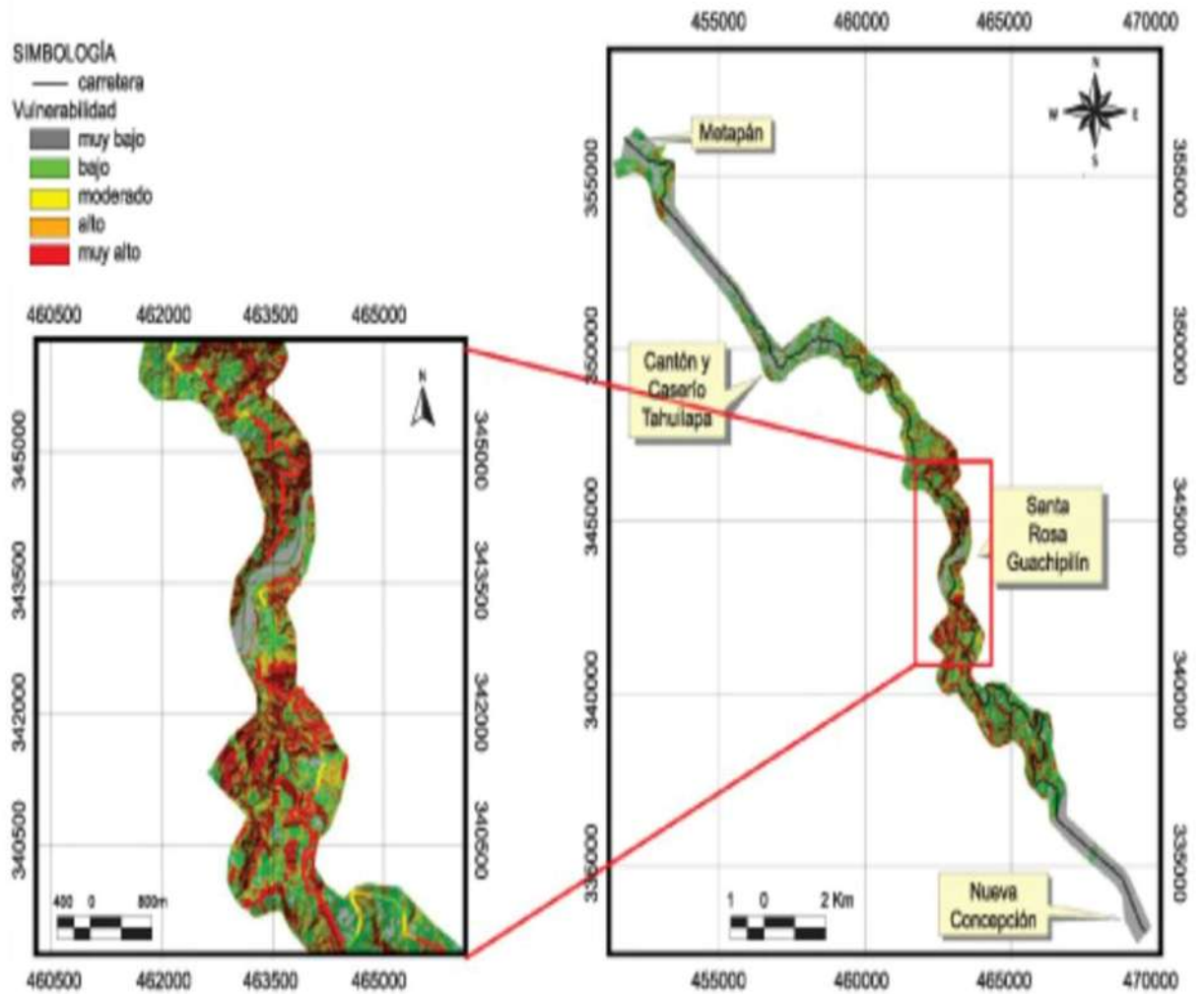
UNIDAD GEOLÓGICA	RANGOS	SUSCEPTIBILIDAD	ÁNGULO OBSERVADO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Lavias andesíticas Formación El Bálsamo (B2)	0 - 11	Muy baja	27,5	11,0
	11 - 22	Baja		
	22 - 33	Moderada		
	33 - 44	Alta		
	> 44	Muy alta		
Sedimentos fluviales y lacustres. Formación Cuscatlán (C1)	0 - 9	Muy baja	25,0	9,5
	9 - 19	Baja		
	19 - 29	Moderada		
	29 - 39	Alta		
	> 39	Muy alta		
Lavias andesíticas y basálticas. Formación Cuscatlán (C3)	0 - 14,25	Muy baja	28,0	9,5
	14,25 - 23,75	Baja		
	23,75 - 33,25	Moderada		
	33,25 - 41,75	Alta		
	> 41,75	Muy alta		
Lavias dacíticas y andesíticas. Formación Chalatenango (C1)	0 - 11,75	Muy baja	26,0	9,5
	11,75 - 21,25	Baja		
	21,25 - 30,75	Moderada		
	30,75 - 40,25	Alta		
	> 40,25	Muy alta		
Lavias dacíticas y andesíticas. Formación Morazán (m2)	0 - 17	Muy baja	27,5	7,0
	17 - 24	Baja		
	24 - 31	Moderada		
	31 - 38	Alta		
	> 38	Muy alta		
Sedimentos metamorfizados. Formación Metapán (me1)	0 - 16,5	Muy baja	28,5	8,0
	16,5 - 24,5	Baja		
	24,5 - 32,5	Moderada		
	32,5 - 40,5	Alta		
	> 40,5	Muy alta		

Fuente: Rev. Infraestructura vial, Vol. 10 (#19), 2008, Universidad de Costa Rica.

Con respecto a la metodología de Kanji la vulnerabilidad determinada por esta metodología será asignada a la infraestructura vial existente en el punto de unión entre la cuenca y el corredor vial. Los datos de cada cuenca se presentan en la Tabla 5 y los resultados gráficos se muestran en la Figura 3, donde se muestra la

susceptibilidad de todo el tramo de carretera y el tramo más crítico de vulnerabilidad.

Figura 3. Resultados de los factores utilizados en la metodología de Kanji



Fuente: Rev. Infraestructura vial, Vol. 10 (#19), 2008, Universidad de Costa Rica.

Tabla 5. Resultados de los factores utilizados en la metodología de Kanji

CUENCA	FACTORES	DATOS	GP	P	TOTAL	CLASIFICACIÓN
CUENCA 1	inclinación de ladera (S)	7,09	0	3,6	23,24	BAJA
	inclinación del canal de drenaje (D)	23,85	6,6	0,7		
	área de cuenca (A)	0,367	10	1,4		
	altura de ladera (H)	73	0	1,4		
	vegetación (V)	62,73	6,6	0,7		
	aspectos geológicos (G)	G4	0	2,2		
CUENCA 2	inclinación de ladera (S)	4,25	0	3,6	28,19	BAJA
	inclinación del canal de drenaje (D)	15,95	6,6	0,7		
	área de cuenca (A)	0,468	10	1,4		
	altura de ladera (H)	91	0	1,4		
	vegetación (V)	39,86	3,3	0,7		
	aspectos geológicos (G)	G3	3,3	2,2		
CUENCA 3	inclinación de ladera (S)	3,59	0	3,6	28,00	BAJA
	inclinación del canal de drenaje (D)	31,21	10	0,7		
	área de cuenca (A)	0,247	10	1,4		
	altura de ladera (H)	82	0	1,4		
	vegetación (V)	87,03	10	0,7		
	aspectos geológicos (G)	G4	0	2,2		
CUENCA 4	inclinación de ladera (S)	7,16	0	3,6	25,62	BAJA
	inclinación del canal de drenaje (D)	81,13	10	0,7		
	área de cuenca (A)	0,356	10	1,4		
	altura de ladera (H)	99	0	1,4		
	vegetación (V)	51,72	6,6	0,7		
	aspectos geológicos (G)	G4	0	2,2		

Fuente: Rev. Infraestructura vial, Vol. 10 (#19), 2008, Universidad de Costa Rica.

2.4 METODOLOGÍA 4.

Metodología Simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña.

Esta metodología se aplicó en Agosto de 2007 a un tramo con un caso típico de deslizamiento en Costa Rica.

Esta metodología es de evaluación simplificada de la vulnerabilidad física de rellenos o terraplenes sobre laderas, aplicable en la gestión de riesgos de carreteras de montaña. [12]

2.4.1 Desarrollo de la Metodología

Con base en el fundamento teórico y las investigaciones previas analizadas, se evalúan todos los factores determinantes (propiedades de resistencia y las condiciones geométricas) de la vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña y se proponen tres modelos de análisis.

Aquí se evalúan las variaciones de altura, ancho, pendientes, posición del nivel freático, humedad, relación de vacíos, peso unitario, resistencia en condición drenada y no drenada y coeficiente sísmico. (Ver anexo F)

Modelos y análisis

✓ Modelo Varablanca

Como punto de partida para el análisis de todos los factores que intervienen en la estabilidad de los rellenos en carreteras de montaña, se elige un caso típico de deslizamiento que sea representativo de las condiciones propias de las rutas. Mediante el análisis de la topografía y la interpretación de fotografías se obtiene finalmente el perfil para realizar el estudio.

Se debe tener en cuenta un modelo geotécnico "Varablanca" de la zona, donde se consideran las siguientes variables geométricas:

- θ : pendiente del terreno natural
- β : ángulo del talud del relleno
- h: altura del relleno
- a: ancho de la carretera o vía
- d: ancho del relleno con respecto a la carretera

- s: altura de la gaveta o banqueo de liga
- e: ancho del banqueo, se utiliza de 3 m por efectos constructivos
- x: longitud de la proyección horizontal del talud del relleno

Para la obtención de los parámetros geotécnicos, se emplean las propiedades típicas de materiales tanto para terraplenes como para el terreno natural. Finalmente se utilizan los rangos de variación básicos para el análisis paramétrico de la evaluación de la estabilidad del modelo geotécnico Varablanca (Ver tabla 6), con los cuales se analiza la ocurrencia de falla, influencia de la posición del nivel freático en la estabilidad, influencia del peso unitario del relleno como mecanismo de activación de deslizamientos, y con base en estos resultados inferir las variables que determinan la estabilidad de los rellenos que cuentan con esta configuración geométrica.

Tabla 6. Propiedades paramétricas del modelo geotécnico Varablanca [13]

Material	γ humedo	γ saturado	Cohesión (no drenada)	Ángulo de fricción drenada
	$(\text{KN/m})^3$	$(\text{KN/m})^3$	Kpa	$(^\circ)$
Terreno	16,19	18,15	$20 < C < 10,12$	$15 < \phi < 30$
Relleno	19,62	20,93	$50 < C < 200$	$25 < \phi < 35$

Fuente: Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

Con el fin de evaluar el efecto de las gavetas de liga en la estabilidad, se compara el factor de seguridad (FS) y la ubicación de la superficie de falla en el modelo,

obtenidos inicialmente, con los banqueos y posteriormente, simulando un plano de unión lineal entre el relleno y el suelo de cimentación. Este modelo simplificado produce el mismo FS con prácticamente igual ubicación de falla.

Por otra parte se evalúa la influencia de la posición del nivel freático en la estabilidad, con esto y como es de esperarse, conforme aumenta el grado de saturación del relleno aumentan las cargas hidrostáticas, se reduce el efecto de succión y se pierde resistencia o cohesión. Esto confirma la importancia de las obras de drenaje subterráneas y sobre todo el control estricto de la evacuación del agua y el mantenimiento preventivo de alcantarillas, las cuales son uno de los detonantes principales para elevar el nivel freático.

Finalmente, mediante variación paramétrica, se observa que para la condición no drenada, al fluctuar el peso unitario del modelo, ó la relación de vacíos del terraplén, se infiere que cuanto mayor peso unitario o bien menor relación de vacíos tenga el material del relleno o del suelo, se necesita mayor resistencia en condición no drenada para alcanzar la estabilidad. Esto es perfectamente lógico, ya que al aumentar el peso del talud se incrementan las fuerzas motoras del deslizamiento, lo que disminuye el factor de seguridad asociado y requiere de una mayor resistencia para asegurar la estabilidad. En cuanto a la condición drenada, la estabilidad no se asocia directamente con el peso de los materiales sino con la configuración geométrica de la infraestructura.

✓ **Modelo talud Infinito**

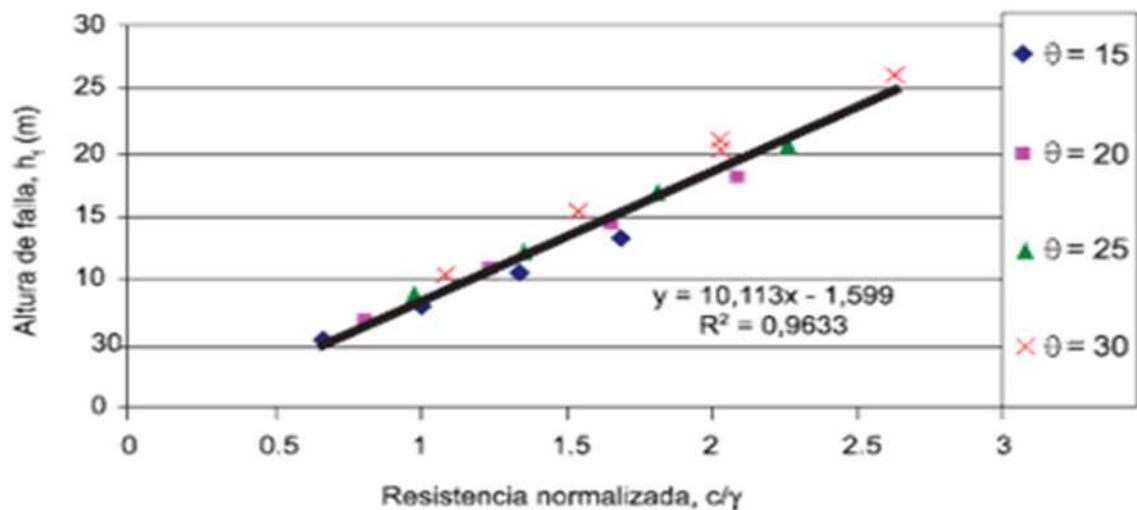
La configuración de talud infinito se utiliza para caracterizar los casos en los cuales la falla afecta solamente al talud de los rellenos y no alcanza a la estructura del pavimento, la cual también es típica de taludes de corte. El análisis del talud infinito se realiza variando tanto los ángulos de la pendiente entre (15° y 30°), como el contenido de humedad, el peso unitario y la resistencia en condición drenada y no drenada.

En condición drenada, el ángulo de fricción de los materiales debe ser mayor o igual a la inclinación del talud ($\phi' \geq \beta$) para alcanzar la estabilidad, tal y como lo expresa la ecuación:

$$F.S = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta}$$

En condición no drenada la altura de la zona de falla (FS=1) correlaciona linealmente con la resistencia en condición no drenada (c) normalizada por el peso unitario del material (γ), tal como se observa en la figura 4.

Figura 4. Variación de la resistencia normalizada (c/γ) con la altura de falla para el modelo de Talud infinito



Fuente: Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

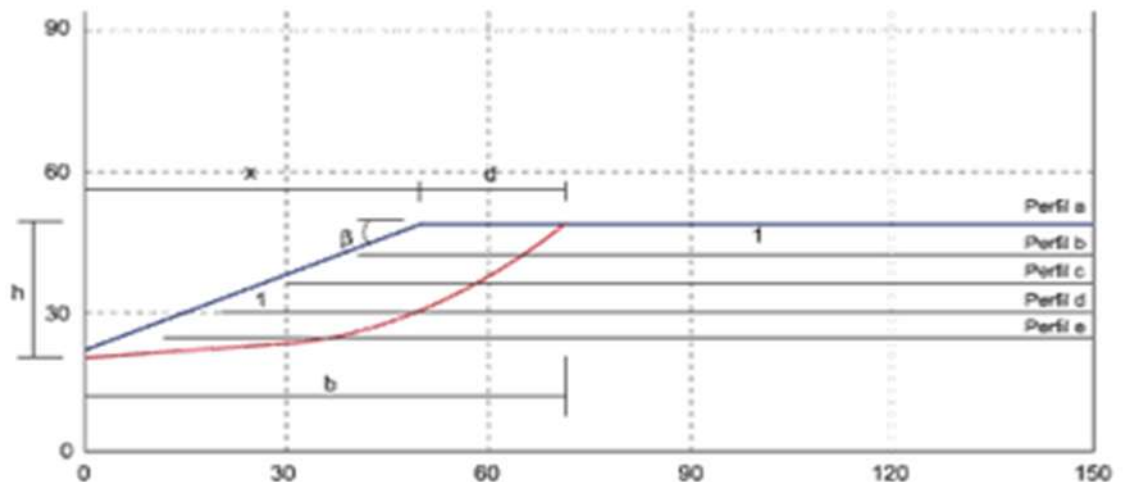
Se puede observar que existe una relación aproximadamente lineal entre la altura de falla y la resistencia normalizada, con un coeficiente de correlación cercano a la unidad. Por lo tanto, la ecuación permite obtener la altura crítica de falla del talud

si se conocen la resistencia en condición no drenada (c) y el peso unitario (γ) o viceversa.

✓ Modelo de terraza

Para evaluar de manera simplificada el caso más frecuente en que la falla alcanza la estructura del pavimento y afecta el “hombro” del relleno, se plantea un modelo de terraza, que permite inferir el comportamiento de los rellenos en laderas de la forma más aproximada a la geometría real de la falla de un terraplén. El modelo toma en cuenta la configuración típica de un talud de relleno como un talud que termina en una superficie horizontal, tal como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Modelo simplificado de terrazas



Fuente: Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

Variables del modelo:

- β : ángulo de inclinación del relleno, varía de 15° a 30° con incrementos de 5° .

- x: dimensión horizontal del talud del relleno, varía de 0 m a 50 m
- d: ancho de la corona del relleno que desliza
- b: longitud de la proyección horizontal de la superficie de falla
- h: altura del relleno, varía de acuerdo al perfil y se calcula como $h = x * \tan \beta$.

En condición drenada se debe cumplir la misma condición límite del ángulo máximo del talud infinito, es decir $\varphi' \geq \beta$.

Para la condición no drenada, también de forma similar que para el talud infinito, la condición más crítica es la de saturación total. (Ver Tabla 7)

✓ **Implicaciones para reducir la vulnerabilidad**

La reducción de vulnerabilidad de los terraplenes de carretera de montaña implica necesariamente el aumento del factor de seguridad para alcanzar la estabilidad. No todas las soluciones son igualmente apropiadas para ese objetivo y los resultados de esta investigación permiten analizar la eficacia y limitaciones de las mismas.

Por ejemplo, el uso de muros de gaviones en laderas, introduce mayor peso sobre el suelo de cimentación y puede producir un cambio en la configuración de la falla, sin resolver el problema. La figura 6.1 muestra un caso en el cual se da una falla en condición no drenada (A) con altura h_a , controlada por las propiedades del suelo (c_1/γ_1). Al introducir el muro de gaviones (B), el factor de seguridad para la altura h_a se incrementa, gracias a la alta resistencia normalizada del mismo (c_2/γ_2). Sin embargo, la combinación de resistencia del suelo (c_1) con el peso unitario del muro (γ_2) produce una condición potencialmente inestable ($FS < 1$), señalada por el punto C. Mientras el suelo no se sature podría mantener la estabilidad, dado que la succión aporta resistencia adicional ($c_3 > c_1$), pero no se puede considerar que esta sea una solución adecuada en una ladera.

✓ **Criterios para evaluación de vulnerabilidad**

La vulnerabilidad geotécnica de los rellenos sobre laderas depende de los parámetros de resistencia del suelo en condición drenada (ϕ') y no drenada (c), así como del peso unitario (γ) y la geometría (altura, ancho y ángulo del talud). En este estudio se utilizan los criterios de vulnerabilidad mostrados en la tabla 8, con base en el factor de seguridad.

Tabla 7. Ecuaciones y correlación asociada a los factores de seguridad [16]

Modelo factor de seguridad (FS)	Ecuación	Correlación R ²
Terraza con FS=1,0	$hfalla=6,5698(C/\gamma)+0,5325$	0,9991
Terraza con FS=1,25	$hfalla=5,2524(C/\gamma)+0,5393$	0,9992
Terraza con FS=1,5	$hfalla=4,3674(C/\gamma)+0,5636$	0,9991
Terraza con FS=2,0	$hfalla=3,276(C/\gamma)+0,565$	0,9992
Terraza con FS=3,0	$hfalla=2,1846(C/\gamma)+0,5586$	0,9991
Talud infinito con FS=1	$hfalla=10,113(C/\gamma)-1,599$	0,9633

Fuente: Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

Tabla 8. Rangos de FS y criterios de vulnerabilidad [17]

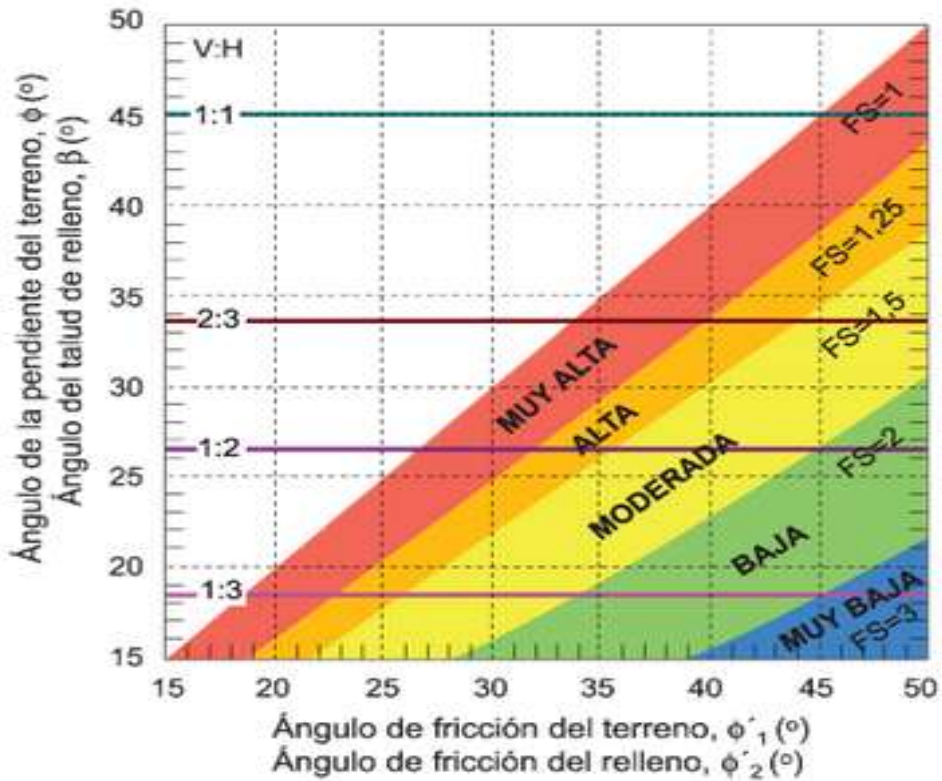
Factor de seguridad FS	Criterio	Color
$1,0 < FS < 1,25$	Vulnerab. Muy alta	Rojo
$1,25 < FS < 1,5$	Vulnerab. alta	Naranja
$1,5 < FS < 2,0$	Vulnerab. Moderada	Amarillo
$2,0 < FS < 3,0$	Vulnerab. Baja	Verde
$FS < 3,0$	Vulnerab. Muy baja	Azul

Fuente: Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

Teniendo en cuenta esta metodología se obtiene que la configuración de las pendientes del terreno y del talud del relleno deba tener como límite superior el ángulo de fricción del material correspondiente.

Aplicando los criterios definidos anteriormente se obtiene el nomograma para cuantificar el grado de vulnerabilidad de un terraplén en condición drenada y no drenada, los cuales se presentan en la figura 7 y 8.

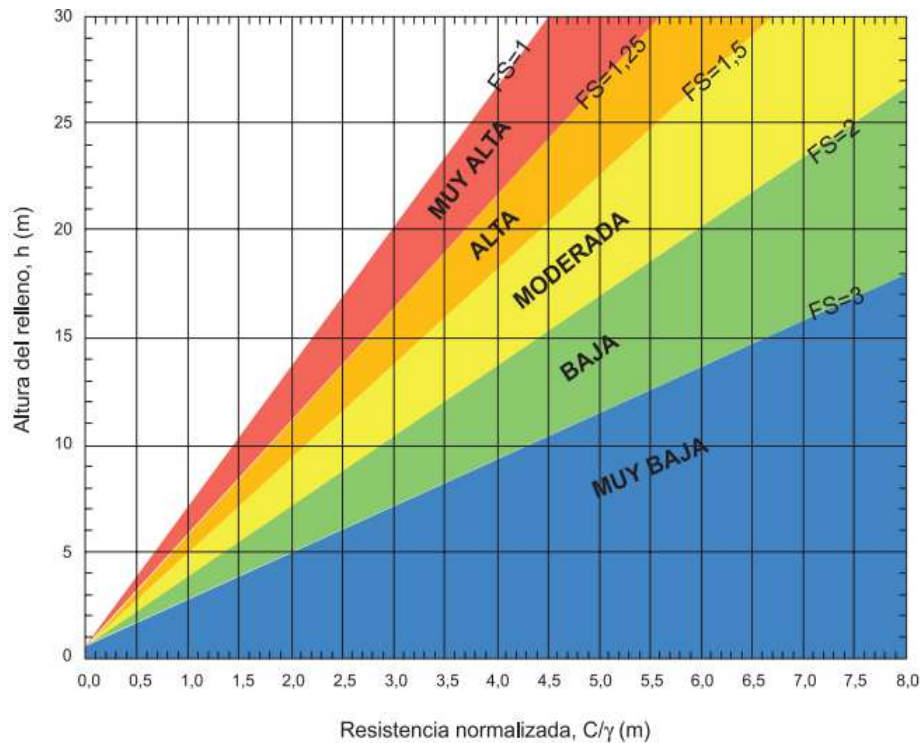
Figura 6. Vulnerabilidad geométrica de los rellenos en condición drenada. [19]



Fuente: Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

El gráfico permite evaluar la vulnerabilidad mediante la comparación de los ángulos θ y β con los ángulos de fricción del suelo, ϕ'_1 y del relleno ϕ'_2 , respectivamente. Es evidente que el ángulo de fricción mínimo del material debe ser al menos el ángulo del talud correspondiente para garantizar estabilidad (FS=1) pero es necesario o deseable un ángulo superior para garantizar una vulnerabilidad moderada.

Figura 7. Vulnerabilidad geométrica de los rellenos en condición no drenada. [20]



Fuente: Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

De forma similar se analiza para la condición no drenada, en donde se relaciona la altura del relleno con la resistencia normalizada (c/γ) en función del FS. De esta forma se obtiene una herramienta guía muy importante, con el fin de tomar decisiones y orientar al ingeniero en el diseño y retro-análisis de deslizamientos de rellenos en laderas.

2.5 METODOLOGÍA 5.

Metodología Para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia

La guía metodológica desarrollada se aplicó en Enero de 2011 a cuatro sectores continuos del proyecto de la segunda calzada entre Bogotá y Villavicencio

(Colombia) los cuales comprenden entre la quebrada Naranjal hasta la quebrada Chirajara una longitud aproximada de 14 Km.

La metodología consiste en el estudio de cada una de las variables contempladas para la definición de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. [21]

2.5.1 Parámetros. Los principales parámetros que tiene en cuenta la metodología son:

- Geomorfología
- Morfología: forma en planta, forma en perfil, espesor del depósito.
- Morfometría
- Morfo dinámica: procesos anteriores, erosión pluvial, erosión fluvial.
- Geología: estructura del suelo
- Litología: depósitos coluviales, suelos residuales
- Perfil de meteorización
- Estado del material

2.5.2. Desarrollo de la Metodología. Para el desarrollo de la matriz de susceptibilidad se tienen en cuenta ciertas variables y sus diferentes tipos de categorías que se definen de la siguiente manera:

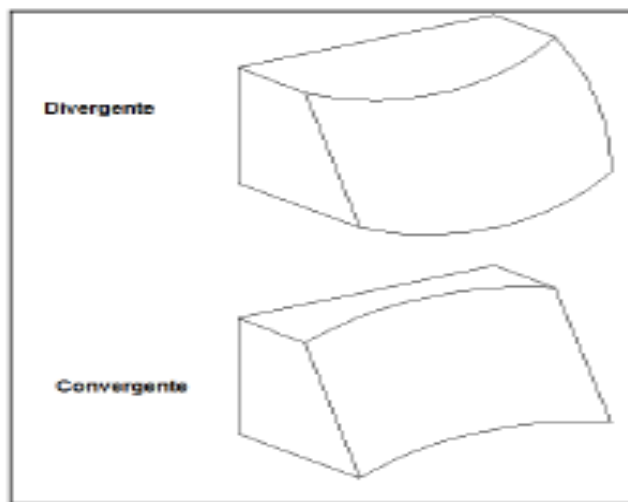
Geomorfología

✓ Morfología

Para el análisis morfológico se tuvo en cuenta tanto la forma en planta como la forma en perfil con el propósito de definir un tipo de relieve específico asociado a una mayor o menor susceptibilidad a los deslizamientos dependiendo de cada categoría.

Forma en planta: Van Den Eeckhaut establece como algunas de sus variables para el cálculo de la susceptibilidad tres categorías de la curvatura en planta de las cuencas, y las describe como convergente, divergente y paralela que para el caso de esta metodología se tomó como uniforme, siendo el primer parámetro el que más peso e importancia tiene dentro de la matriz de susceptibilidad.

Figura 8. Variación de la forma en planta [22]



Fuente: Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

Forma en perfil: La forma en perfil de la ladera refleja la homogeneidad de la resistencia de los materiales presentes allí y la presencia de estructuras geológicas. En el presente estudio se tienen en cuenta las formas en perfil de tipo convexo, cóncavo y rectilíneo.

En la siguiente tabla se describe cada una de estas categorías y su relación con varios tipos de deslizamientos.

Tabla 9. Forma en perfil de la ladera [23]

CLASE	CARACTERISTICAS DEL MATERIAL	PROCESOS ASOCIADOS
CONVEXO	Materiales blandos y disposición estructural casi horizontal	Predomina meteorización y erosión. Pequeños deslizamientos rotacionales.
CONCAVO	Materiales blandos y disposición estructural no diferenciada.	Deslizamientos rotacionales
RECTILINEO	Alta Resistencia y disposición estructural a favor de la pendiente.	Movimiento traslacional

Fuente: Adaptado de Carvajal et al, 2004

Espesor del depósito: Para estimar la influencia del espesor del depósito y la importancia de este en la estabilidad de las laderas, se emplea el método del talud infinito, el cual considera un espesor de depósito homogéneo a lo largo del talud mediante la siguiente ecuación:

$$F.S = \frac{c' + (\gamma * z - \gamma w * zw) \cos^2 \beta * \tan \varphi}{\gamma * z + \text{sen} \beta * \cos \beta}$$

Dónde:

C' = Cohesión efectiva (kPa)

γ = Peso unitario del suelo (kN/m³)

γ w = Peso unitario del agua (kN/m³)

Z = Espesor del suelo (m)

Zw = Altura de la Tabla de agua

β = Inclinación del talud (°)

φ = Angulo de fricción efectivo (°)

Del análisis realizado por este método, se logra establecer que el máximo espesor a evaluar es de 5.0 m, ya que a partir de este espesor la variación del factor de seguridad es mínima con respecto al intervalo entre 0.0 y 5.0 m. [24]

✓ **Morfometría**

Se establecen unos rangos de inclinación de taludes para evaluar la susceptibilidad a deslizamientos y que varían entre 15 y 45 grados. Para establecer los factores de importancia o pesos asignados a cada uno de los rangos, se basa en un estudio realizado en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín donde establecen que la mayoría de deslizamientos se producen en pendientes entre 12 y 35 grados.

Figura 9. Factores de peso para la pendiente [25]

Pesos Pendiente		
Pendiente	# Evento	%
45	1	3%
35 - 45	7	18%
25 - 35	9	23%
16 - 25	17	43%
0 - 16	6	15%
Total	40	

Fuente: Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

✓ **Morfo dinámica**

La morfo dinámica es la parte de la geomorfología que trata de los procesos geodinámicos externos.

En el presente estudio se tienen en cuenta tres variables morfo dinámicas para la evaluación de la susceptibilidad, las cuales se definen como la existencia o no de procesos anteriores, la erosión pluvial y la erosión fluvial los cuales se detallan a continuación:

Procesos anteriores: se desarrolla haciendo uso de inventario de deslizamientos, ya que esto es un indicador bastante acertado de cómo es y como ha sido el comportamiento de la ladera en estudio en el pasado, lo que permite aclarar el panorama de cómo será el comportamiento de la misma en el futuro.

Para el presente estudio se establecen tres categorías de procesos anteriores, tales como, Existe, existe y ya se intervino, y no existe, con lo cual se pretende evaluar el estado actual de las laderas. Con base en las tres categorías anteriores se establecen los factores de importancia, asignando el máximo valor (1,0) al primer parámetro debido a su significancia, ya que la existencia de deslizamientos supone una mayor inestabilidad de la zona en estudio. Posteriormente se asigna un valor a 0,5 al segundo parámetro (Existe y ya se intervino), ya que esto supone una mayor mitigación del riesgo. Finalmente se asigna un valor cercano a cero al último parámetro, ya que la no existencia de deslizamientos, asegura un comportamiento estable de la zona.

Erosión Pluvial: La erosión pluvial se refiere a la exposición de los materiales térreos debido al efecto de las lluvias generando esto un arrastre por escorrentía, y produciendo un escurrimiento difuso, lo que conlleva a una erosión laminar de las capas de suelo.

Erosión Fluvial: La erosión fluvial puede llegar a producir deslizamientos significativos que afectan notablemente la estructura de la vía, llegando a producir cierres totales de la vía durante considerables periodos de tiempo. Las dos categorías utilizadas para evaluar la erosión fluvial, son en orden de importancia,

la socavación lateral, la cual es producida por el impacto que sobre las laderas tienen los meandros de los ríos, y la socavación de fondo que, como su nombre lo indica, corresponde al aumento de la sección transversal del canal debido al arrastre del fondo del cauce.

Considerando estas dos categorías, se opta por asignar un valor de peso dentro de la matriz de susceptibilidad de 1.00 a la socavación lateral y un valor de 0.7 a la socavación de fondo, ya que el efecto desestabilizante de la primera puede llegar a ser mucho mayor que en el segundo caso.

Geología

Dentro de la variable Geología se determinan cuatro (4) grandes áreas para el presente estudio:

✓ **Litología**

Para la evaluación de la litología se decide determinar la variable “Tipo de material”, y a su vez determinar cinco categorías que pretenden abarcar la mayoría de escenarios posibles de los materiales más comunes que se puedan encontrar.

Estas categorías se identifican como:

Depósitos de material coluvial: Teniendo en cuenta todas sus características, se decide asignar un valor de 1.0 dentro de esta escala.

Suelo residual: Debido a que es muy común encontrar este tipo de suelos, y que su incidencia en la ocurrencia de deslizamientos es muy alta dada sus características mecánicas, se opta por asignar un valor de 0,90 a esta categoría.

Depósito glaciar: Se plantea para el presente estudio asignar un valor de 0,8.

Depósitos aluviales: se opta por asignar un valor de peso de 0,70 dentro de la matriz de susceptibilidad.

Roca: en este caso se asigna un valor de peso de 0,05 dentro de la matriz de susceptibilidad por ser este el menos crítico.

Perfil de meteorización

Para determinar las diferentes categorías de perfil de meteorización se tiene en cuenta la clasificación que tienen diferentes autores y que se puede ver resumida en la Tabla 10.

En cuanto a la caracterización del perfil de meteorización dentro de la matriz de susceptibilidad, esta se subdivide en cuatro categorías, las cuales son Roca sana, roca meteorizada, saprolito y suelo residual, como el más crítico es la presencia de suelo residual, se le asigna un valor dentro de la categoría de 1,00. Para las demás categorías se procura distribuir los factores de peso de manera proporcional entre 0,05 y 1,00. Dichos factores se encuentran en la tabla 10.

Tabla 10. Perfil de meteorización según diversos autores

PERFIL ESQUEMÁTICO	LOVE (1951) LITTLE (1961)	VARGAS (1951)	SOWERS (1954, 1963)	CHANDLER (1969)	GEOLOGICAL SOC. ENG. GROUP (1970)	DEERE Y PATTON (1971)	
	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS, BASÁLTICAS Y ARENISCAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	MARGAS Y LIMOLITAS	ROCAS ÍGNEAS	ÍGNEAS Y METAMÓRFICAS	
	VI SUELO	SUELO RESIDUAL	ZONA SUPERIOR	IV COMPLETAMENTE ALTERADA	VI SUELO RESIDUAL	HORIZONTE IA	
	V COMPLETAMENTE ALTERADA	SUELO RESIDUAL JOVEN	ZONA INTERMEDIA	PARCIALMENTE ALTERADA	IV _a	HORIZONTE IB	
	IV ALTAMENTE ALTERADA	CAPAS DE ROCA DESINTEGRADA	ZONA PARCIALMENTE ALTERADA		III	V COMPLETAMENTE ALTERADA	HORIZONTE IC (SAPROLITO)
	III MODERADAMENTE ALTERADA				IV ALTAMENTE ALTERADA	ZONA DE TRANSICIÓN	IA TRANSICIÓN CON ROCA METEORIZADA SAPROLITO
	II ALGO ALTERADA	ROCA SANA	ROCA INALTERADA	ROCA INALTERADA	III MODERADAMENTE ALTERADA		IB PARCIALMENTE METEORIZADA
	I ROCA SANA				II DEBILMENTE ALTERADA	IB MUY POCO ALTERADA	ROCA SANA
					I ROCA SANA		

Fuente: Muelas 2000

Estado del material

Las categorías contempladas dentro de la variable se identifican como de densidad suelta, densa y muy densa para el caso de los materiales granulares, y de consistencia blanda, media y firme para el caso de materiales finos.

Estructura

Clasificación del macizo

Para el presente estudio, se selecciona la clasificación propuesta por Hoek y Brown en 1994, o GSI (Geological Strength Index) debido principalmente a su sencillez para poder evaluar cada uno de los parámetros del macizo, obteniéndose

finalmente rangos de valores que oscilan entre 0 y 100, siendo el valor de 100 el que caracteriza las mejores condiciones del macizo rocoso.

Uso del suelo

La última especialidad a evaluar dentro de la matriz de susceptibilidad es la ambiental, dentro de la cual se evalúa como única área el uso del suelo, el cual está analizado a su vez como tipo de cobertura.

Para el presente estudio se definen seis (6) tipos de cobertura según el tipo de uso del suelo, las cuales son:

- Pastizal
- Terreno árido
- Rastrojo
- Vegetación mixta
- Urbana
- Vegetación nativa

Matriz de susceptibilidad






Con base en todos los conceptos anteriormente definidos se realiza la matriz de susceptibilidad y se asignan los pesos de cada una de las variables utilizadas.

Rangos de susceptibilidad

En el presente estudio se definen cinco (5) rangos de susceptibilidad, los cuales se muestran en la tabla 11.

Para determinar estos rangos se procede a elaborar una variación de los casos más probables que se pueden presentar al evaluar cada una de las variables de la matriz, es decir, los casos más críticos donde se toman los valores más altos de cada una de las variables; los valores intermedios, e igualmente los rangos más bajos de cada una de ellas.

Tabla 11. Rangos de susceptibilidad calculados para la metodología [26]

SUSCEPTIBILIDAD		
MB	0 - 0.169	
B	0.17 - 0.339	
M	0.34 - 0.509	
A	0.51 - 0.679	
MA	> 0.68	

Fuente: Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011

Detonante

Una vez definida la matriz de susceptibilidad, y previo a la matriz de amenaza es necesario la definición y obtención del detonante de deslizamientos.

Deslizamientos superficiales

La determinación del detonante de deslizamientos superficiales se elabora con base en el modelo propuesto por Pradel y Raad en (1993), el cual tiene en cuenta diferentes parámetros que influyen en la infiltración del suelo.

La ecuación fundamental del modelo se muestra a continuación donde la intensidad de la lluvia para movilizar un espesor de suelo dado está en función de la porosidad efectiva del material, el espesor de suelo y la succión matricial del frente húmedo.

$$I_{min} = \frac{\mu}{T_{min}} * \left(Z_w - S * \ln \left(\frac{S + Z_w}{S} \right) \right) * \left(\frac{Z_w + S}{Z_w} \right)$$

Dónde:

I_{min} = Intensidad (mm/h)

m = Porosidad.

S = Succión capilar del frente húmedo (m de agua).

Z_w = Espesor del material movilizado (mm).

La asignación de los pesos de cada una de las gráficas se realiza con base en la diferenciación de cinco intervalos en los que se divide cada una de las gráficas y que están en función de la profundidad de avance del frente húmedo, ya que no se tiene una tendencia de la variación de la curva intensidad duración con el espesor. Por tal motivo, se decide asignar el valor más bajo en 0,2 para depósitos de suelo inferiores a 0,50m, y así sucesivamente en intervalos de 0,2 para cada espesor hasta obtener el valor más alto de 1,0 para un espesor de suelo mayor a 2,0m como se muestra en la siguiente Tabla:

Tabla 12. Rangos establecidos para el detonante de deslizamientos superficiales. [28]

DETONANTE SUPERFICIALES			
Muy Bajo	MB	0.2	
Bajo	B	0.4	
Medio	M	0.6	
Alto	A	0.8	
Muy Alto	MA	1	

Fuente: Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

Deslizamientos profundos

Tabla 13. Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos según lluvia evento.
[29]

LLUVIA EVENTO *	
Lluvia Max en 24 h	Prob Ocurrencia
>40 mm	0,8
30 - 40	0,6
20 - 30	0,4
0 - 20	0,2

Fuente: Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

Estos rangos son los seleccionados como el detonante y son combinados posteriormente con los de susceptibilidad para establecer la matriz de amenaza para deslizamientos profundos.

Tabla 14. Rangos establecidos para el detonante de deslizamientos profundos.
[30]

DETONANTE PROFUNDOS			
Muy Bajo	MB	< 0.10	
Bajo	B	0.1 - 0.2	
Medio	M	0.2 - 0.5	
Alto	A	0.5 - 0.6	
Muy Alto	MA	> 0.6	

Fuente: Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

Matriz de amenaza

El establecimiento de la matriz de amenaza permite asociar los rangos establecidos tanto en la matriz de susceptibilidad como los asociados al detonante de deslizamientos superficiales y profundos, por lo que finalmente se obtienen dos matrices por separado, una para deslizamientos superficiales y otra para deslizamientos profundos, con las que se realizan las combinaciones respectivas para determinar los rangos de amenaza para cada uno de los casos.

- **Matriz de amenaza deslizamientos Superficiales**

El ensamble de la matriz de amenaza ante deslizamientos superficiales consiste en situar por un lado en la primera columna los rangos obtenidos en la matriz de susceptibilidad, y en la primera fila se sitúan los rangos establecidos previamente en el detonante de deslizamientos.

Una vez establecidas estas dos variables de entrada se procede a realizar la operación cuantitativa de cada uno de los términos. Para establecer los rangos de la matriz de amenaza se realiza un análisis cualitativo de estas variables de entrada, es decir, combinando los rangos entre cada uno de ellos (Por ejemplo, Una susceptibilidad muy alta combinada con un detonante muy alto produce un valor de amenaza muy alto).

- **Matriz de amenaza deslizamientos profundos**

El ensamble de la matriz de amenaza de deslizamientos profundos se realiza de la misma manera que para la matriz de deslizamientos superficiales, es decir, por un lado se tienen las variables de entrada en la primera columna (Rangos de susceptibilidad), y en la primera fila se disponen los rangos establecidos para el detonante, los cuales en este caso corresponden a los seleccionados del estudio realizado por Mayorga (2003), los cuales quedan establecidos con base en la relación lluvia (Lluvia acumulada / Media anual) como bajo para valores menores a

0,2, medios para un rango entre 0,2 y 0,5, y altos para valores de relación lluvia mayores a 0,5.

Vulnerabilidad

Después de tener el mapa de amenaza, el cual tiene definidas cada una de las áreas con diferentes valores de amenaza, se calcula el índice de vulnerabilidad para los diferentes elementos expuestos.

Para obtener el índice de vulnerabilidad se decide trabajar con las funciones definidas por Galli & Guzzetti (2007), para elementos expuestos como construcciones, vías principales y vías secundarias.

Guzzetti definió la función de comportamiento a partir de las siguientes ecuaciones:

-Vías Principales: $V_v = 0.0013 * A^{0.62}$

-Vías Secundarias: $V_v = 0.0010 * A^{0.62}$

-Construcciones: $V_v = 0.0006 * A^{0.62}$

Dónde:

Vv = Índice de vulnerabilidad

A = Área de la zona potencialmente deslizada

Con estas ecuaciones y cada una de las áreas obtenidas en el mapa de amenaza se puede calcular el índice de vulnerabilidad.

Patrones de daño

Se identifican tres patrones de daño a partir de las consideraciones realizadas por Guzzeti:

- **Cosméticos**

Son aquellos daños que requieren arreglos menores y que son de tipo netamente operativo. Con base en el índice de vulnerabilidad, estos daños están catalogados en un rango de 0 a 0.2.

- **Funcionales**

Son aquellos daños que causan una reparación del elemento expuesto. Con base en el índice de vulnerabilidad, estos daños están catalogados en un rango de 0.2 a 0.6.

- **Estructurales**

Son aquellos daños que causan una reconstrucción total del elemento expuesto. Con base en el índice de vulnerabilidad, estos daños están catalogados en un rango de 0.6 a 1.0.

Costos

La evaluación de los costos se realizó evaluando los directos e indirectos y para cada uno de ellos se definió lo siguiente:

- **Costos Directos:**

Son los costos que se tienen que asumir de forma directa por el propietario de la infraestructura en el momento en que se materializa la amenaza. Estos son la reparación o reconstrucción de la vía, de las viviendas aledañas y los costos de reposición de los vehículos perdidos.

- **Costos Indirectos:**

Por otro lado, en cuanto a los costos indirectos, se tiene en cuenta la vulnerabilidad social como la cantidad de pérdida de vidas humanas y la vulnerabilidad económica que tiene en cuenta las pérdidas que se pueden presentar para los transportadores de carga si la carretera se cierra.

Riesgo

Para el caso particular de este estudio se aplica de la siguiente manera:

$$RIESGO = AMENAZA * VULNERABILIDAD * COSTO \text{ ElementoExpuesto}$$

Riesgo cualitativo

Desde el punto de vista cualitativo la valoración del riesgo se realiza a partir de los resultados del cruce de la matriz de la amenaza y la vulnerabilidad. A partir de la matriz se puede establecer los rangos en los que se mueve el riesgo.

Tabla 15. Matriz de Riesgo Cualitativo [31]

RIESGO CUALITATIVO							
		AMENAZA					
		MB	B	M	A	MA	
		0.03	0.10	0.22	0.41	0.75	
VULNE	C	0.10	BAJO	BAJO	BAJO	MEDIO	MEDIO
	F	0.40	BAJO	MEDIO	MEDIO	MEDIO	ALTO
	E	0.80	MEDIO	MEDIO	ALTO	ALTO	ALTO

Fuente: Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

Riesgo cuantitativo

Para la calificación del riesgo desde el punto de vista cuantitativo inicialmente es necesario establecer la posible frecuencia de ocurrencia del evento dados los valores de amenaza. Para esto se utilizan los valores determinados por Hungr

(1997) (Ver anexo G), y se obtiene una probabilidad de ocurrencia la cual se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Probabilidad Anual de Ocurrencia dado el Valor de Amenaza [32]

AMENAZA	PROBABILIDAD ANUAL DE OCURRENCIA
Muy Baja	1 / 2500
Baja	1 / 500
Media	1 / 100
Alta	1 / 20
Muy Alta	1 / 10

Modificado: Hungr (1997)

Fuente: Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

2.6 METODOLOGÍA 6

Metodología para el análisis de riesgo y vulnerabilidad en proyectos de carreteras.

Esta metodología fue aplicada en Guatemala en noviembre de 2012 para evaluar el posible riesgo del tramo de un poco más de 30 km de la carretera CA-1 Occidente entre los puntos de Los Encuentros en el km 127+300 y Nahualá en el km 158+150 y así dar su respectiva solución.

Básicamente se realiza un análisis de riesgo asociado a un tramo de carretera partiendo de dos etapas fundamentales previas: la evaluación de amenazas y la evaluación de vulnerabilidad respectivamente. [33]

2.6.1 Parámetros

Los principales parámetros que tiene en cuenta la metodología son:

- Uso de suelo: suelo agrícola
- Clima
- Sismicidad
- Deslizamientos

2.6.2 Desarrollo de la Metodología

- **Procedimiento para evaluar el riesgo en las carreteras**

De acuerdo al criterio que se adopta en este estudio para evaluar el riesgo existente en la infraestructura vial, es necesario seguir un procedimiento que cumpla con los siguientes parámetros:

- Establecer las características de la estructura y sus componentes.
- Determinar cuáles fenómenos naturales representan amenazas potenciales para el tramo vial bajo estudio.
- Evaluar las amenazas más significativas dentro del área geográfica bajo estudio.
- Estimar la vulnerabilidad global del tramo vial bajo estudio.

Evaluación de las amenazas

Este análisis consiste en identificar las amenazas naturales y antrópicas que podrían darse en un espacio y en un período de tiempo determinados, con suficiente magnitud para producir daños físicos, económicos y ambientales en los

proyectos de carreteras que se están formulando. Para ello es necesario saber qué tipos de amenazas puedan existir en la zona en la que se localice el proyecto.

Los parámetros que se consideran en este trabajo para el análisis de las amenazas son las siguientes:

- **Análisis del historial de las amenazas**

Comprende la elaboración de un mapa que identifique las amenazas que podrían afectar la zona en la que se localizará el proyecto con el fin de incorporar el conocimiento local de la población. Se debe de aprovechar la información escrita existente. Para ello se utilizará la metodología del Mapa Parlante, cuyos objetivos, Participantes e información a obtener son los siguientes:

- ✓ Identificar en un mapa la ubicación espacial de la carretera, sus amenazas naturales y/o antrópicas.
- ✓ Identificar las zonas de riesgo actuales, por la presencia de amenazas y factores de vulnerabilidad.

Tabla 17. Información a obtener con el Mapa Parlante [34]

TEMA	INFORMACIÓN
Ubicación del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> ° Tipo de suelos ° Uso del suelo
Hidrología	<ul style="list-style-type: none"> ° Cuencas ° Acueductos ° Obras de drenajes ° Mantos freáticos
Geología	<ul style="list-style-type: none"> ° Estabilidad de taludes de corte ° Estabilidad de taludes de relleno ° Mapas de fallas geológicas
Tipo de sección construida	<ul style="list-style-type: none"> ° Terraplen o relleno ° Corte en balcon ° Corte en trinchera ° Puente
Identificación de zonas que han sido afectadas por distintos peligros, indicando fechas aproximadas de ocurrencia.	<ul style="list-style-type: none"> ° Inundaciones ° Lluvias intensas ° Deslizamientos ° Sismos ° Estructuras (puentes, bóveda, tuberías)

Fuente: Metodología para el análisis de riesgo y vulnerabilidad en proyectos de carreteras, Universidad de San Carlos, Guatemala, Noviembre de 2012.

- **Análisis de los estudios de pronóstico de amenazas**

Recolectar información básica sobre el terreno donde se ubicará el proyecto, así como de su entorno inmediato, en cuanto a:

- ✓ Atlas sobre las principales amenazas identificadas en el análisis y estimación de riesgo a nivel departamental, municipal, correspondientes al alineamiento del proyecto.

- ✓ Mapas de amenaza sísmica, volcánica, deslizamientos, inundaciones, flujos de lava y otros.
- ✓ Planes de ordenamiento territorial, planes de gestión, estudios de micro zonificación, estudios de uso del suelo y similares.
- ✓ Inventarios históricos de desastres, información sobre incidentes atendidos, pronósticos meteorológicos, etc.

- **Grado de recurrencia de las amenazas**

La probabilidad de ocurrencia de una amenaza depende de su período de retorno, el cual es el tiempo esperado o tiempo medio entre dos sucesos improbables y con posibles efectos catastróficos.

La frecuencia se define de acuerdo con el período de recurrencia de cada una de las amenazas identificadas, el cual puede estimarse con base en Información histórica o en estudios de prospectiva. La intensidad se define como el grado de impacto de una amenaza específica.

- **Amenazas a considerar en los proyectos de carreteras**

Dentro de las amenazas a considerar que en su mayoría son naturales, es importante mencionar que también existen por la influencia del ser humano, que muchas veces actual inconscientemente. Dichas amenazas naturales y Antrópicas se describen a continuación:

- ✓ Sismo
- ✓ Inundación
- ✓ Viento
- ✓ Deslizamiento
- ✓ Erupciones volcánicas
- ✓ Amenazas Antrópicas (Generadas por la actividad humana)

Evaluación de vulnerabilidad

Este análisis consiste en identificar las vulnerabilidades asociadas a la exposición, fragilidad y falta de resiliencia de los proyectos de carreteras. El análisis de vulnerabilidad será realizado conforme las actividades que se enumeran a continuación:

✓ **Vulnerabilidad por exposición**

La exposición de los proyectos está estrechamente relacionada con su micro localización. Entre las zonas de localización están:

Zona de dominio público: Comprende los terrenos ocupados por las carreteras y sus elementos funcionales.

Zona de servidumbre: Consiste en dos franjas de terreno situadas a ambos lados de la misma, cuyo límite se encuentra a una distancia de veinticinco metros en autopistas, autovías y vías rápidas y de ocho metros en el resto de las carreteras, medidas desde el final de la zona de dominio público.

Zona de afección: Las zonas de afección consisten en dos franjas de terreno a ambos lados de la carretera que llegan hasta cien metros en autopistas, autovías y vías rápidas y cincuenta metros en el resto de las carreteras, más allá del final de las zonas de servidumbre.

Línea de edificación: A ambos lados de las carreteras se establece la línea límite de edificación, desde la cual queda prohibido cualquier tipo de obra de construcción, reconstrucción o ampliación.

Línea de servicios generales: A ambos lados de la carretera, y en una franja de terreno de cuatro metros de anchura situados con inmediación a la línea exterior de servidumbre hacia la carretera.

✓ **Vulnerabilidad por fragilidad**

La fragilidad del proyecto a sufrir daños está estrechamente vinculada con vulnerabilidad física de las carreteras; por ejemplo, la fragilidad física se traduce en la ausencia de estructuras sísmo resistente en las carreteras. Entre los elementos estructurales de la carretera están:

Pavimento: Está constituido por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales las cuales son: subrasante, subbase, base y carpeta de rodadura.

Taludes de corte y rellenos en carreteras: Los taludes de corte y relleno han demostrado ser los puntos más vulnerables de la infraestructura vial.

✓ **Vulnerabilidad por falta de resiliencia**

La falta de resiliencia del proyecto está estrechamente vinculada con el mantenimiento y recuperación de la infraestructura, la organización social para las emergencias, y la capacitación e investigación. Una carretera, por mejor diseñada o construida que esté, necesita un mantenimiento adecuado, de lo contrario se deteriorará rápidamente.

Evaluación de riesgo

La gestión del riesgo consiste en la planificación y aplicación de medidas orientadas a impedir o reducir los efectos adversos de los fenómenos peligrosos sobre la población, los bienes, los servicios y el ambiente. Para el cumplimiento de este concepto serán realizadas las actividades que se enumeran a continuación:

- ✓ Identificación de medidas de reducción de riesgo por exposición
- ✓ Identificación de medidas de reducción de riesgo por fragilidad
- ✓ Identificación de medidas de reducción de riesgo por resiliencia

Sin embargo, previo a la identificación de las medidas de reducción de riesgos es necesario contar con los resultados del análisis de vulnerabilidad.

Identificación de medidas de reducción de riesgo

Las medidas de mitigación pueden ser estructurales. Algunos ejemplos de medidas de mitigación estructurales son: muros de contención, terraplenes, bordillos, cunetas, estructura de pavimento, subrasante, drenaje menor, drenaje mayor, etc.

La identificación de las medidas de mitigación debe realizarse tomando en cuenta, al menos tres criterios:

- ✓ Identificar el nivel de incidencia que las medidas tienen en la solución del problema.
- ✓ Verificar la interdependencia de las medidas y agrupar las que consideren complementarias.
- ✓ Verificar la factibilidad técnica y física de su implementación.

Como resultado de este análisis deben encontrarse al menos dos opciones de medidas de mitigación que se consignan en la tabla 18 y que alternativamente, puedan resolver el problema de vulnerabilidad y así reducir el riesgo del proyecto.

Tabla 18. Matriz de medida de mitigación

No.	Tramo		Lado	Tipo de amenaza	Vulnerabilidad estructural	Estado actual	Medida de mitigación	Observaciones
	De	A						
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
N								

Fuente: Metodología para el análisis de riesgo y vulnerabilidad en proyectos de carreteras, Universidad de San Carlos, Guatemala, Noviembre de 2012.

Identificación de las medidas de reducción de riesgo por exposición

Para esto primero se deben determinar los fenómenos, si los hay, que imponen una mayor amenaza y luego se deben preparar evaluaciones de los mismos e introducir medidas de mitigación de riesgos en el contexto de un estudio de desarrollo sostenible integrado.

Identificación de las medidas de reducción de riesgo por fragilidad

Conociendo ya los elementos estructurales de la carretera que son vulnerables a una amenaza, se deben conocer los desastres ocasionados por las mismas, para tomar las medidas de mitigación adecuadas.

Identificación de las medidas de reducción de riesgo por resiliencia

En la etapa de preparación es importante tener un mantenimiento constante para reducir la vulnerabilidad y aumentar la capacidad de respuesta (resiliencia) de la infraestructura vial.

3. ANÁLISIS COMPARATIVO

Todas las metodologías no pueden ser analizadas ni comparadas desde la misma perspectiva ya que algunos de los factores involucrados en cada una de ellas son diferentes. Por esto es fundamental identificar cada una de las características para obtener las ventajas y desventajas y al mismo tiempo buscar la metodología que mejor se adapta y mayor aplicabilidad tiene ante cualquier situación que requiera la evaluación del riesgo, amenaza y vulnerabilidad de la infraestructura vial rural.

Para identificar dichas características se realiza un cuadro comparativo donde se involucran todas las metodologías recopiladas anteriormente.

3.1 ELEMENTOS DE CLASIFICACIÓN

Los parámetros que se proponen para realizar la clasificación son los siguientes:

- Nombre de la metodología
- Año
- País
- Aplicación: Tipo de Vía
- Parámetros Utilizados
- Ventajas
- Desventajas

3.2 OBSERVACIONES

De acuerdo con el análisis realizado utilizando el cuadro comparativo presentado en el Anexo H, se plantean algunas observaciones descritas a continuación:

Después de la investigación y recopilación de información, la mayoría de metodologías son aplicadas en los países de centro y sur América.

Cada metodología contiene ciertos parámetros para su desarrollo y unas características que permiten su aplicación dependiendo del tipo de corredor vial, además, la mayoría de estas se usan bajo condiciones de remoción de masas, deslizamientos, sismos e inundaciones.

Para la aplicación de todas las metodologías se necesitan sistemas de información geográfica (SIG) tales como perfilmap y mapas satelitales del tramo de carretera en estudio. Sin embargo para una de las metodologías se necesita también modelos de elevación digital (MED).

4. CONCLUSIONES

Un sistema de transporte vial seguro, eficiente y menos vulnerable a peligros naturales, genera confianza en los usuarios del sistema, fortaleciendo la exportación y por lo tanto el crecimiento económico de la región.

La falta de información sobre los peligros naturales que amenazan cada uno de los corredores de algunos países hace que las matrices de vulnerabilidad se presenten con datos faltantes.

Los estudios de vulnerabilidad son herramientas a través de las que se puede determinar la viabilidad o no de un proyecto.

El análisis comparativo de diferentes carreteras con estos indicadores de riesgo y vulnerabilidad económica, permitirá constatar resultados y observar diferencias y dependencias de la vulnerabilidad con los niveles de lluvia, condiciones geométricas y características geológico-geotécnicas propias de cada carretera.

Cuando la carretera no cuenta con sistema de alcantarillado ni construcción de puentes, ni posee la capa de pavimento asfáltico, no es posible la aplicación de las diferentes metodologías para verificar la vulnerabilidad de estos componentes, así como tampoco se aplica la metodología de vibración sísmica, por encontrarse la carretera en una zona de baja amenaza sísmica.

La evaluación del riesgo por deslizamientos cuyo detonante principal es la lluvia, es de gran importancia para los intereses económicos tanto del estado como de los sectores privados ya que permite identificar y seleccionar acciones de mitigación contra este tipo de procesos.

La metodología constituye un avance y un aporte importantísimo en la principal problemática de los corredores viales, ya que permite a través de un hilo conductor determinar los sitios críticos del corredor y evaluar de forma práctica todos los costos asociados a dicha problemática.

Las medidas de mitigación aumentan la capacidad de respuesta de la carretera, reduciendo el desastre, pero su eficacia es medida en función de los costos necesarios para reducir la vulnerabilidad.

Este estado del arte proporciona información sobre las diferentes metodologías para brindar un apoyo y contribuir en la mitigación de riesgos de la infraestructura vial ya que permite dar aviso sobre posibles problemas presentes en los diferentes corredores viales; además de ser una guía para futuras investigaciones.

Es importante tener en cuenta que algunos de los criterios y parámetros utilizados en las metodologías varían según el país y la zona de aplicación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Congreso Nacional de Infraestructura, Cartagena, Colombia, Noviembre de 2013.

[2] Ranking Mundial de la calidad de infraestructura vial. https://www.sectorial.co/index.php?option=com_content&view=article&id=29468:panorama-vial-en-colombia-grandes-proyectos-de-infraestructura-con-importantes-retrasos-en-las-obras&catid=40:informes-especiales&Itemid=208

[3] Congreso de la Cámara Colombiana de Infraestructura, Cartagena, Noviembre de 2012.

[4] Guía análisis de riesgos naturales para el ordenamiento territorial, Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, Primera edición, junio 2011, Chile.

[5] Corporación Financiera del Valle S.A., Colombia, Febrero 1999.

[6] Estudio general sobre los tramos vulnerables a los peligros naturales de la carretera Panamericana y sus corredores complementarios en Centroamérica, Washington, D.C., 8 de Marzo de 2001.

[7] MTI/Nicaragua.2000 Perfil de vulnerabilidad de la carretera Panamericana Nicaragua.

[8] MTI/Nicaragua.2000 Perfil de vulnerabilidad de la carretera Panamericana Nicaragua.

- [9] Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 7(1).
- [10] Etapas en función del costo por las que puede pasar un tramo de la carretera. Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 7(1).
- [11] Rev. Infraestructura vial, Vol. 10 (#19), 2008, Universidad de Costa Rica.
- [12] Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.
- [13] Propiedades paramétricas del modelo geotécnico Varablanca , Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.
- [14] Variación de la resistencia normalizada (c/γ) con la altura de falla para el modelo de Talud infinito, Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.
- [15] Modelo simplificado de terrazas , Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.
- [16] Ecuaciones y correlación asociada a los factores de seguridad, Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

[17] Rangos de FS y criterios de vulnerabilidad, Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

[18] Configuración geométrica simplificada de un relleno sobre ladera, Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

[19] Vulnerabilidad geométrica de los rellenos en condición drenada, Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

[20] Vulnerabilidad geométrica de los rellenos en condición no drenada, Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, Infraestructura Vial, Vol. 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

[21] Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

[22] Variación de la forma en planta, Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

[23] Forma en perfil de la ladera, Adaptado de Carvajal et al, 2004.

[24] Variación del factor de seguridad con el espesor utilizando el método de talud infinito,] Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

[25] Factores de peso para la pendiente, Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

[26] Rangos de susceptibilidad calculados para la metodología, Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

[27] Perfil de suelo humedecido por lluvia o irrigación, Raad, 1993.

[28] Rangos establecidos para el detonante de deslizamientos superficiales, Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

[29] Probabilidad de ocurrencia de deslizamientos según lluvia evento, Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

[30] Rangos establecidos para el detonante de deslizamientos profundos, Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

[31] Matriz de Riesgo Cualitativo, Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

[32] Probabilidad Anual de Ocurrencia dado el Valor de Amenaza, Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá D.C., Enero de 2011.

[33] Metodología para el análisis de riesgo y vulnerabilidad en proyectos de carreteras, Universidad de San Carlos, Guatemala, Noviembre de 2012.

[34] Información a obtener con el Mapa Parlante, Metodología para el análisis de riesgo y vulnerabilidad en proyectos de carreteras, Universidad de San Carlos, Guatemala, Noviembre de 2012.

BIBLIOGRAFÍA

PALMA, José Antonio. Análisis de riesgo y vulnerabilidad en proyectos de carreteras. Trabajo de grado. Guatemala. : Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2012. 98 p.

PROGRAMA DE NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO Y SECRETARÍA NACIONAL DE GESTION DE RIESGOS. Sistematización de la Metodología de Análisis de Vulnerabilidades a nivel municipal de la infraestructura vial. Ecuador.: 2010-2011. 15 p.

RIMAL DUWADI, Sheila y PAGÁN ORTIZ, Jorge E. Reducción de riesgo a desastres por medio de carreteras resilientes: un programa de investigación y desarrollo. En: Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil. 2013. Vol. 13, no 1, p. 129-143.

SANCHEZ, César Eduardo y URREGO, Luis Fernando. Metodología para la evaluación de riesgo en corredores viales. Trabajo de grado maestría. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, 2011. 138 p.

SEMINARIO-CAF. (Julio 5, 2012: Bogotá, Colombia). INFRAESTRUCTURA PARA EL CAMBIO CLIMÁTICO SECTOR TRANSPORTE, 2012. 41 p.

ZAMORA FANDIÑO, Nélida y BARRERA REYES, Oscar Leonel. Diagnóstico de la infraestructura vial actual en Colombia. Informe final de investigación Postgrados. Bogotá D. C.: Universidad EAN. Facultad de Postgrados, 2012. 156 p.

ANEXOS

Anexo A. Formato de presentación de información de tipo matriz

Identificación del tramo	Origen	Destino	Nombre del Puente (si el caso)	Longitud del tramo (Km)	Identificación de la amenaza (Inundaciones)	Localización del tramo vulnerable	Longitud vulnerable (Km)	Frecuencia	Severidad	Tipo de Pavimento	Tipo de Suelo	Estado actual de la carretera	Tránsito promedio diario anual (TPDA)	Tipo de Carga	Volumen de carga	Historia de desastres del país en general

Nota: Este mismo formato se utiliza para deslizamientos y sismos.

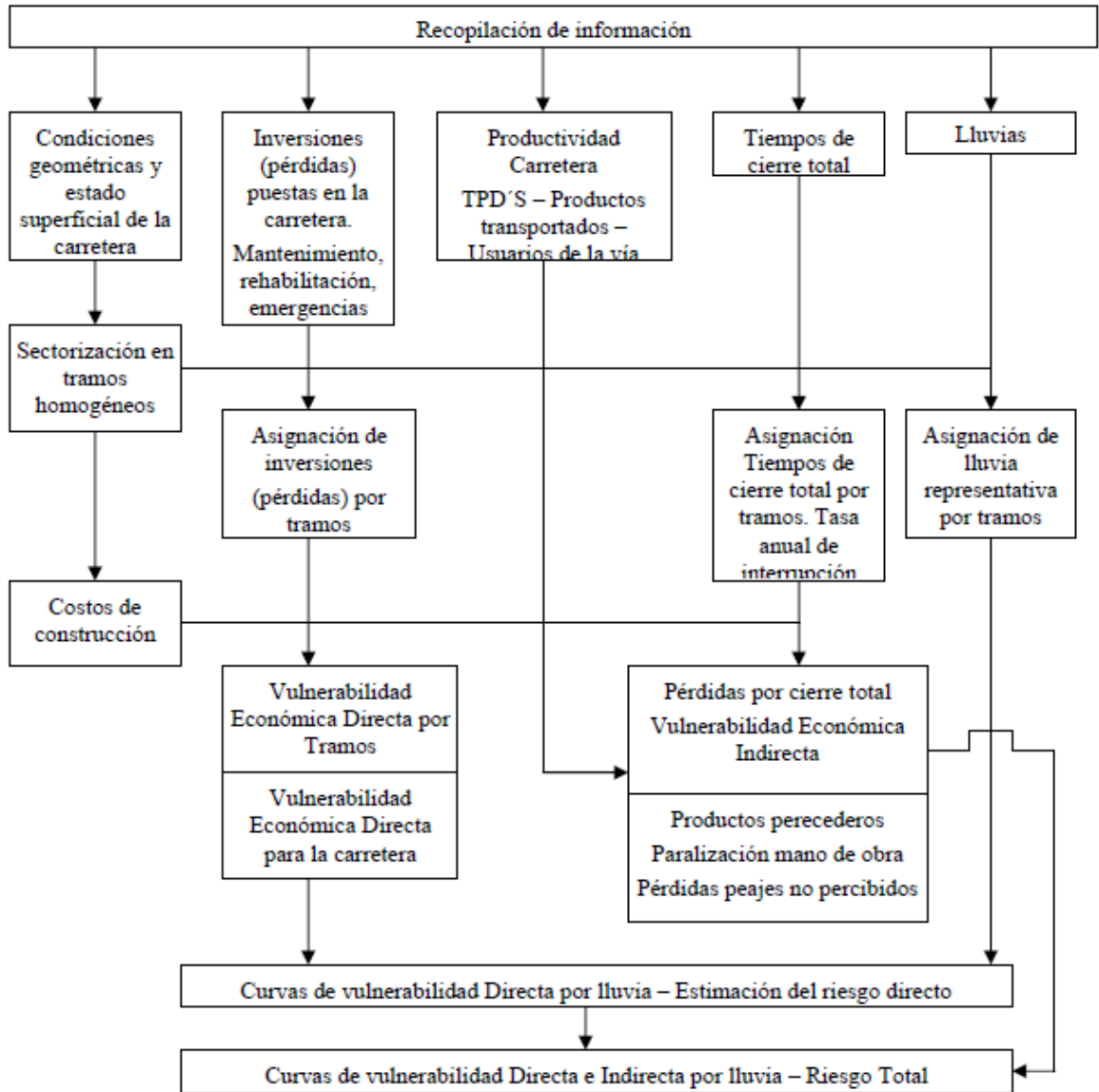
Fuente: Estudio general sobre los tramos vulnerables a los peligros naturales de la carretera Panamericana y sus corredores complementarios en Centroamérica, Washington, D.C., 8 de Marzo de 2001.

Anexo B. Niveles de Vulnerabilidad a las Amenazas Naturales

Amenaza	Nivel moderado 1	Nivel medio 2	Nivel alto 3	Nivel muy alto 4
Volcánica	Este nivel de amenaza está condicionado a la cantidad de cenizas emitidas durante la erupción y a las condicionantes atmosféricas y dirección de los vientos.	Nivel condicionado a las caídas de los piroclastos de diferentes tamaños. Estos tamaños son función de la granulometría. Va desde arenas hasta cenizas.	Se aplica a erupciones de tipo estrombolianas o plinianas, áreas afectadas a los flujos de lavas, gases y posibles nubes ardientes y bombas.	Determinantes en zonas próximas a conos volcánicos, emisión de gases, lava o explosiones violentas, gran volumen de piroclastos.
Deslizamiento	Sitios con rocas masivas sin estratificación, baja o nula permeabilidad que impide la meteorización profunda y limita los procesos de desmoronamiento del conjunto. Pendientes menores del 3 % y precipitaciones menores a 150 mm/año.	Zonas con rocas sedimentarias y metamórficas, incluyendo calizas, pizarras y areniscas. Posibilita el almacenamiento de agua, la meteorización y la fracturación. Pendientes entre 3 y 10%, propiciando las condiciones de deslizamientos. Precipitaciones entre 150 y 200 mm/año.	Zonas volcánicas con diferentes capas, alternando diferente permeabilidad, consistencia y fracturación. Las condiciones morfológicas y el clima inciden sobre la estabilidad de los materiales. Pendientes oscilan entre 11 y 25 %. Precipitaciones de 300 mm/año y también se encuentran depósitos aluviales.	La roca tiene la consistencia de una arcilla. Fracturación intensa. Zonas propicias para el almacenamiento de agua. Los suelos presentan rocas altamente meteorizadas. Pendientes mayores al 25% y as precipitaciones mayores a los 300 mm/año.
Sismicidad	La magnitud del sismo es menor de 3 en la escala de Richter, la profundidad de epicentros entre 100 y 300 km, sismos difícilmente perceptible por la población.	Los sismos oscilan entre 3 y 4 en la escala de Richter, la profundidad de los epicentros varía entre 30 y 100 km.	Los sismos oscilan entre 4 y 5 en la escala de Richter y la profundidad de los epicentros de 0 a 30 km.	Sismos mayores que 5 en la escala de Richter y la profundidad de los epicentros varía entre 0 y 30 km.
Inundaciones	Áreas que presentan un relieve menor del 2%, las precipitaciones menores a los 150 mm/año, el suelo presenta mayor capacidad de retención debido a la existencia de bosques y los tiempos de respuesta son mayores a 24 horas.	Las precipitaciones oscilan entre 150 y 200 mm/año, presentan un relieve entre el 2 y el 10%, la capacidad de retención de los suelos es poca, en algunas áreas el régimen hidrológico ha sido alterado y hay presencia de deforestación. El tiempo de respuesta oscila entre 12 y 24 horas.	El relieve oscila entre el 10 y 25%, las precipitaciones entre 200 y 300 mm/año, existe una fuerte erosión de los suelos y el tiempo de repuesta oscila entre 3 y 12 horas.	Las precipitaciones son mayores a los 300 mm/año, el relieve es mayor del 25% y la capacidad de retención de los suelos es poca o nula, ya que los terrenos se dedican a la labor intensiva. Los tiempos de respuesta son inferiores a tres horas.

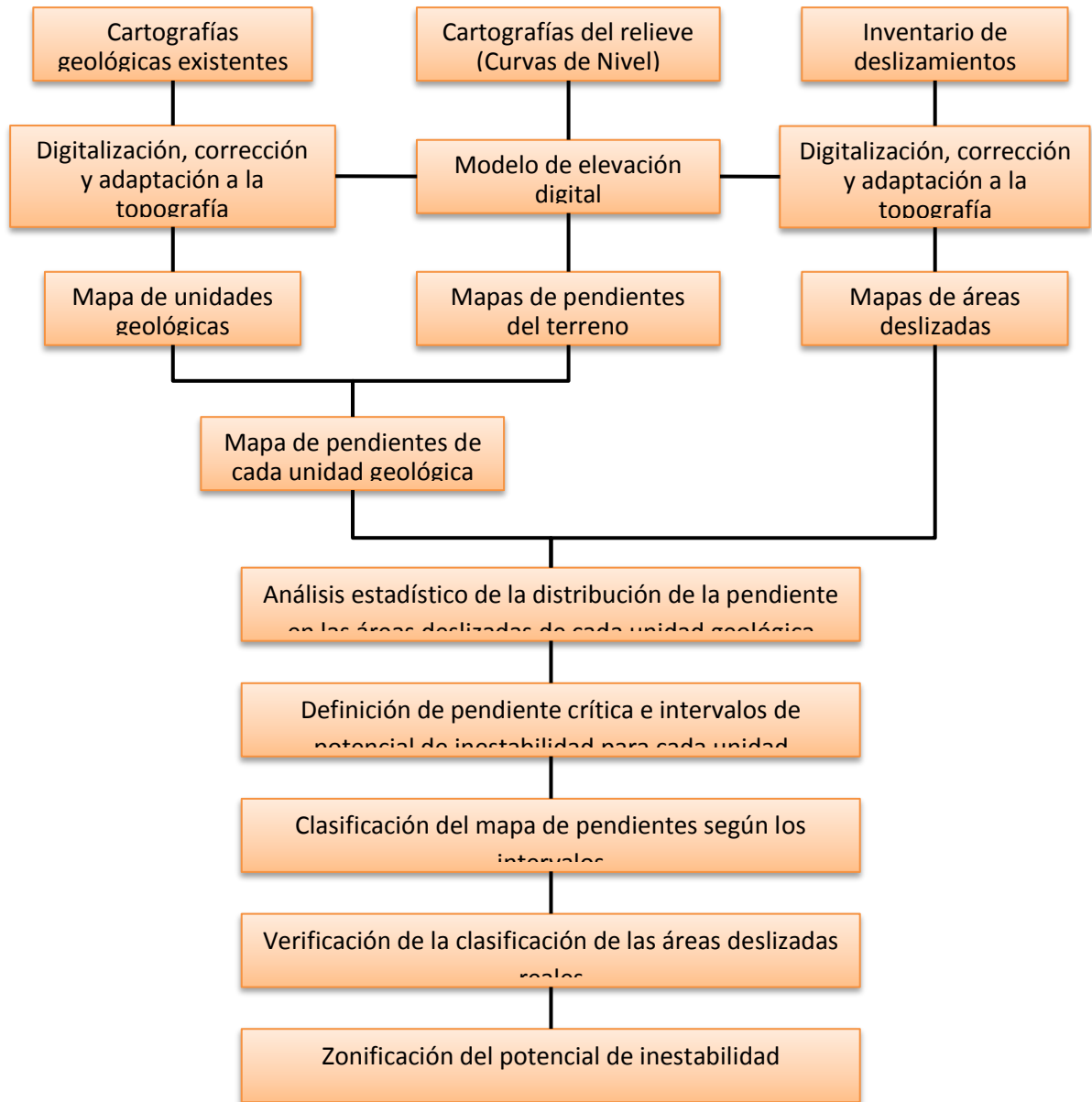
Fuente: Estudio general sobre los tramos vulnerables a los peligros naturales de la carretera Panamericana y sus corredores complementarios en Centroamérica, Washington, D.C., 8 de Marzo de 2001.

Anexo C Descripción de la metodología propuesta para evaluación de las curvas de vulnerabilidad económica por lluvia



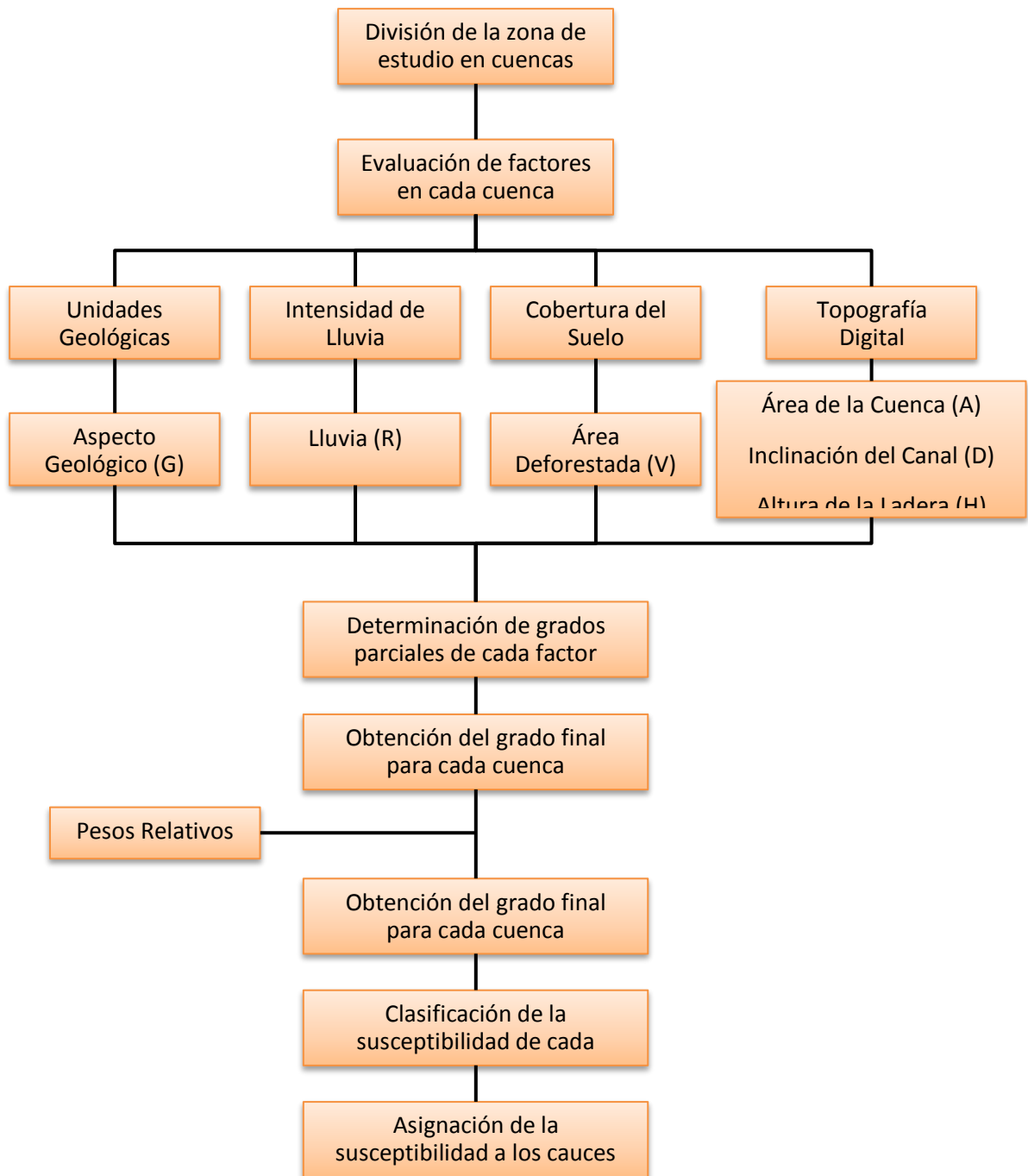
Fuente: Rev. Int. De Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 7(1).

Anexo D Esquema de la metodología del ángulo crítico



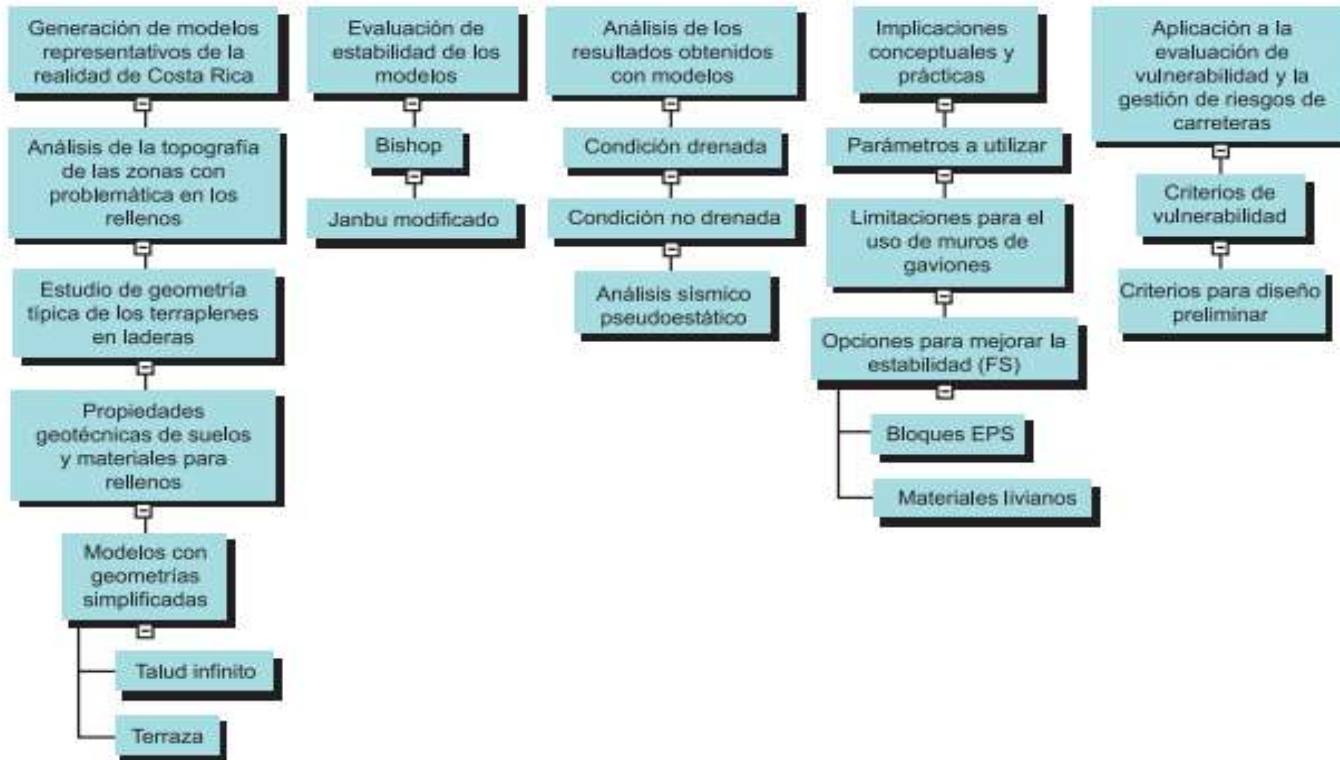
Fuente Esquema de la metodología del ángulo crítico

Anexo E Esquema de la metodología de flujos de lodo basada en Kanji



Fuente. Esquema de la metodología de flujos de lodo basada en Kanji

Anexo F Metodología de la Investigación



Fuente: Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña, *Infraestructura Vial*, Vol 19 (#18), Costa Rica, 4-14. 2007.

Anexo G Escala sugerida de probabilidades para la magnitud o intensidad de un deslizamiento

Término	Rango de Frecuencia (1/año)	Significado
Muy alta probabilidad	$> 1/20$	El deslizamiento puede ser inminente. Los eventos de deslizamiento ocurrirían con un periodo de retorno de 20 años o menos y dejarían signos claros de perturbación relativamente frescos.
Alta	$1/100 - 1/20$	Debe esperarse que ocurra un deslizamiento dentro del tiempo de vida de una persona o de una estructura típica. Son identificables las perturbaciones, pero no parecen recientes.
Media	$1/500 - 1/100$	La ocurrencia de un deslizamiento en el término de un tiempo de vida no es probable, pero es posible.
Baja	$1/2500 - 1/500$	Una probabilidad anual de $1/2500$ es de significado incierto.
Muy Baja	$< 1/2500$	Este límite es comparable con la probabilidad asociada al sismo creíble, máximo que se usa para el diseño de presas en Canadá.

Fuente: Hungr (1997).

Anexo H Cuadro comparativo de las metodologías estudiadas.

METODOLOGÍAS PARA EVALUAR EL RIESGO, AMENAZA Y VULNERABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL RURAL				
Nombre	Año	País	Aplicación: Tipo de vía	Parámetros utilizados
Estudio General sobre los Tramos Vulnerables a los Peligros Naturales de la Carretera Panamericana	2001	Centroamerica (Panamá, Honduras, Nicaragua, Guatemala, Costa Rica y El Salvador)	Corredores viales de los diferentes países	Geología, Geotecnia, Geomorfología, hidrogeología, Sismología, Climatología
Metodología para estimación de curvas de Vulnerabilidad económica por lluvias para Infraestructura vial	2007	Colombia	Vía primaria Tramo carretera Bogotá-Villavicencio	Asignación de precipitación por tramos de la carretera
Análisis de la vulnerabilidad física y amenazas en la carretera longitudinal del norte en las microregiones	2007	El Salvador Metapan y Alto Lempa. Región Norte	Carreteras de Montaña	clima, sismicidad y deslizamientos
Metodología de evaluación simplificada de la Vulnerabilidad geotécnica de terraplenes	2007	Costa Rica	Carreteras de Montañosa	geométricos, físicos y geotécnicos
Metodológica para Evaluación de Riesgo en corredores viales	2011	Colombia	Vía primaria Corredor vial Bogotá-Villavicencio	Geología, Geotecnia, Geomorfología, hidrogeología, Sismología, Climatología
Riesgo y vulnerabilidad en proyectos de carretera	2012	Guatemala	Tramo Via Interamericana	Geología, Geotecnia, Sismología, Climatología

Fuente: Elaboración propia

Anexo I Ventajas y Desventajas de cada una de las metodologías estudiadas

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Estudio General sobre los Tramos Vulnerables a los Peligros Naturales de la Carretera Panamericana y sus Corredores Complementarios en Centroamérica</p>	<p>.Con los perfiles de vulnerabilidad se identificaran reportes y mapas temáticos lo cual permite a los encargados de la gestión vial tomar mejores y más eficientes decisiones a la hora de estudiar la factibilidad de nuevos proyectos en el sector o evaluar las inversiones y estrategias necesarias para la mantención y rehabilitación de los componentes viales.</p>	<p>. El no tener información suficiente ni completa sobre los peligros naturales ni sobre la cantidad y valor de las obras de mitigación prioritarias para reducir la vulnerabilidad, no es posible aplicar la metodología.</p> <p>. Debido a la falta de información sobre peligros naturales, los países dependen mucho de la realización de vicitas de campo para detectar o verificar los tramos más vulnerables, aumentándose los costos de ejecución de los estudios nacionales.</p>
<p>Metodología para estimación de curvas de vulnerabilidad económica por lluvia para infraestructura vial – aplicación carretera Bogotá - Villavicencio (Colombia)</p>	<p>. Si se implementa esta metodología de modo tal que sea dinámica en el tiempo, con capacidad de actualización de la base de datos de inversiones (pérdidas) en cada tramo, puede observarse la buena gestión de la entidad encargada del mantenimiento y operación de la carretera, ya que se entrega un indicador tangible de los beneficios de los dineros invertidos en la carretera al disminuir la vulnerabilidad directa e indirecta.</p> <p>. La interpretación de esta gráfica hace que sea una herramienta para la gestión de carreteras, dado que se tiene un panorama de lo que ha pasado, y da idea de los dineros que deben apropiarse cada año para mantener los mismos niveles de transitabilidad.</p>	<p>. Cuando la carretera atraviesa diferentes unidades geológicas, hace es que su comportamiento geomecánico ante la lluvia sea muy variable para cada tramo.</p> <p>. Los materiales más frágiles causarán pérdidas indirectas más elevadas.</p>

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Análisis de la vulnerabilidad física y amenazas en la carretera longitudinal del norte en las microrregiones de Metapan y Alto Lempa. Región Norte, El Salvador</p>	<ul style="list-style-type: none"> · En lo que corresponde a las características físicas de los taludes de corte y relleno, se deben diseñar de manera que su inclinación y altura sean adecuadas para evitar la falla por cortante de los materiales. · Esta metodología ha sido ampliamente probada en varios casos de estudio en Costa Rica. · A partir del criterio del ángulo crítico se identifican las áreas de mayor susceptibilidad al deslizamiento en un ancho de al menos 200 metros a ambos lados del eje de la vía, según el rango de valores de pendiente obtenidos. 	<ul style="list-style-type: none"> · La evaluación de la amenaza al deslizamiento tiene la dificultad de no presentar periodos de retorno claros (frecuencia) dado principalmente a que pueden ser disparados por múltiples eventos (sismo, lluvia, erosión), por lo que su valoración se limita a evaluar la susceptibilidad (pendiente, geología) y su magnitud (volumen, velocidad). · La inclusión de muchos factores (movimiento en masa) en el análisis de inestabilidad con el SIG no mejora los resultados de la zonificación significativamente.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Metodología Simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Es una metodología de evaluación simplificada para Condición drenada y No drenada. • Permite definir estrategias para el control de la estabilidad de rellenos sobre laderas. • Se apoya directamente en estudios básicos para diagnosticar o diseñar preliminarmente la obra. • Los criterios de vulnerabilidad alcanzados, son una herramienta práctica muy útil para la toma de decisiones y sobre todo para la planificación y evaluación rápida de la influencia de diferentes parámetros en la estabilidad general. • Permite Analizar deslizamientos de terraplenes en forma simplificada. • Permite Predecir el FS, con un error muy bajo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Los resultados se expresan mediante ecuaciones y gráficos que para su aplicación requiere de una evaluación o estimación de los parámetros de resistencia propiedades físicas y coeficiente sísmico.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Metodología para evaluación de riesgo en corredores viales de Colombia	<ul style="list-style-type: none"> • La metodología permite tener un panorama completo del riesgo para cada tramo de vía. • Permite evaluar las pérdidas económicas directas que se podrían presentar si se materializa la amenaza, las pérdidas de vidas humanas, las pérdidas de viviendas aledañas, las consecuencias económicas de tener cerrada la carretera. • La aplicación y/o utilización de la metodología planteada no demanda de recursos importantes para su implementación, por lo que puede ser aplicable en las diferentes fases de un proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> • El modelo no incluye el riesgo por flujos de detritos o avalanchas a lo largo de las quebradas que atraviesan el corredor vial a estudiar. • La persona que utilice la metodología debe tener conocimientos básicos en algún software SIG que permita de una forma sencilla hacer el cruce de los mapas. • Para la carretera en estudio se deben tener estudios básicos de Geología, Geotecnia, Inventario de procesos anteriores, tipos de cobertura entre otros. • Existe dificultad en la evaluación del detonante por deslizamientos profundos por lo que se recomienda realizar futuras investigaciones en este tema.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Metodología para el análisis de riesgo y vulnerabilidad en proyectos de carreteras	<ul style="list-style-type: none"> • Esta metodología sirve de guía para mejorar la calidad de la inversión propiciando la asignación de recursos a los proyectos de mayor rentabilidad social acordes a las prioridades nacionales. 	<ul style="list-style-type: none"> • El inventario de riesgos y vulnerabilidades sólo se puede obtener por la realización de visitas de campo de la zona y de la interpretación de uso de suelo.

Fuente: Elaboración propia.