

# **Modelo de Priorización de Obras Geotécnicas para la Intervención y Mantenimiento de Obras de Infraestructura Vial del CONAVI**





# Abstract

The national road-network covers approximately 7429 kilometers of which are administered by Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI).

According to LANAMME studies approximately 58% of the national roads are in areas with geotechnical issues that could affect the state of them. Therefore CONAVI needs tools to help in planning tasks and maintenance of the road-network, so that, to ensure levels of safety, comfort and serviceability appropriate.

The proposed model has its focus of study geotechnical infrastructures of the road-network without regarding other infrastructure components. This model aims to help in managing the priorities of the national road-network for optimizing the operation and maintenance of geotechnical issues.

This model gathers nine criteria factors taking into account socio-economic, environmental and technical aspects.

Through expert consultation, multi-criteria evaluation methods, databases from different sources and geographic information systems determines the proper order of priority

As a case of study the model was applied to Oreamuno, Cartago zone. The outcome of the study was that, in general, the area has a medium susceptibility to geotechnical problems and the prioritization level of geotechnical aspects is moderate with some damages that need to be treated.

Keywords: geotechnical prioritize, multi-criteria evaluation, Geographic Information Systems.

# Resumen

La red vial nacional cuenta con una extensión aproximada de 7429 kilómetros lineales los cuales están administrados por el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI).

Según estudios de LANAMME aproximadamente el 58% de las carreteras nacionales se encuentran en zonas con problemas geotécnicos que afectan el estado de ellas. Por ello el CONAVI necesita de herramientas que ayuden en la planificación de las tareas de conservación y mantenimiento de la red, de manera que, se garantice los niveles de seguridad, confort y transitabilidad adecuados.

El modelo planteado tiene su foco de estudio las obras geotécnicas del corredor vial dejando de lado los otros componentes de la infraestructura y tiene como objetivo, ayudar en la gestión de la priorización en la intervención y mantenimiento de obras geotécnicas de la infraestructura vial de la red nacional.

En este modelo intervienen nueve criterios que abarcan aspectos socioeconómicos, ambientales y técnicos.

Por medio de la consulta a expertos, métodos de evaluación multicriterio, bases de datos de distintas fuentes y sistemas de información geográfica se determina el orden adecuado de priorización.

Como caso de estudio se aplicó el modelo al cantón de Oreamuno, Cartago donde se determinó que, en general, la zona tiene una susceptibilidad media a problemas geotécnicos y un nivel de priorización de obras geotécnicas moderada con algunas patologías que deben ser tratadas.

Palabras clave: Priorización de obras geotécnicas, evaluación multicriterio, Sistemas de información geográfica.



# **Modelo de Priorización de Obras Geotécnicas para la Intervención y Mantenimiento de Obras de Infraestructura Vial del CONAVI**



# **Modelo de Priorización de Obras Geotécnicas para la Intervención y Mantenimiento de Obras de de Infraestructura Vial del CONAVI**

GABRIEL ENRIQUE CALVO VARGAS

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2013

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN



# Contenido

Índice de Cuadros .....	11
Índice de Figuras.....	12
Resumen Ejecutivo .....	4
Introducción.....	6
Objetivos .....	8
Gestión de Infraestructura Vial .....	9
Geotecnia Vial.....	12
Herramientas para Modelación.....	26
Antecedentes .....	34
Metodología .....	49
Resultados .....	61
Análisis de Resultados.....	74
Alcances y Limitaciones.....	87
Conclusiones.....	88
Recomendaciones .....	90
Bibliografía .....	92



# Índice de Cuadros

Cuadro 1. Escala de valoración de la importancia del criterio .....	50	Cuadro 17. Inventario de Inspección para el tramo 1 .....	64
Cuadro 2. Valoración de la importancia del criterio. ....	51	Cuadro 18. Características del Segundo tramo de Inspección. ....	64
Cuadro 3. Importancia de priorización de la zona .....	55	Cuadro 19. Inventario de Inspección para el tramo 2 .....	65
Cuadro 4. Valoración del desarrollo del territorio según su I.D.S. ....	55	Cuadro 20. Resultado de la Inspección Visual de las estructuras geotécnicas en rutas nacionales (Oreamuno, Cartago) .....	65
Cuadro 5. Valoración de la cercanía con los asentamientos según densidad de viviendas por distrito .....	56	Cuadro 21. Orden de Priorización De Obras Geotécnicas (Oreamuno, Cartago) .....	85
Cuadro 6. Clases de pendiente y valoración del criterio de pendiente .....	56		
Cuadro 7. Valoración del tipo de suelo .....	57		
Cuadro 8. Valoración de la cobertura del suelo	57		
Cuadro 9. Valoración de la precipitación.....	58		
Cuadro 10. Valoración del criterio de sismicidad .....	58		
Cuadro 11. Valoración de la inspección visual..	59		
Cuadro 12. Resultado de la aplicación de la metodología de evaluación CRITIC .....	61		
Cuadro 13. Resultado de la aplicación de la metodología de evaluación de la Entropía .....	61		
Cuadro 14. Resultado del cálculo de la distancia de Manhattan.....	62		
Cuadro 15. Resultado del Análisis de datos. ....	62		
Cuadro 16. Características del Primer tramo de Inspección.....	63		

# Índice de Figuras

Figura 1. Red Pirámide de Costa Rica.....	4	Figura 23. Muro anclado .....	21
Figura 2. Árbol Jerárquico del MPOG .....	4	Figura 24. Anclajes en roca .....	22
Figura 3. Pesos para cada uno de los criterios ...	5	Figura 25. Pantalla anclada .....	22
Figura 4. Componentes principales de la conservación vial. ....	11	Figura 26. Soil nailing.....	22
Figura 5. Caídas .....	15	Figura 27. Pilotes y caissons .....	22
Figura 6. Volcamientos .....	16	Figura 28. Escudos contra caída de rocas .....	23
Figura 7. Deslizamientos rotacionales .....	16	Figura 29. Trincheras contra derrumbes.....	24
Figura 8. Deslizamientos traslacionales .....	16	Figura 30. Protección con defensa de malla metálica.....	24
Figura 9. Movimientos de reptación .....	16	Figura 31. Muros de contención como barrera de protección.....	24
Figura 10. Flujos de detritos y tierra .....	17	Figura 32. Distancia Euclidiana y Manhattan ....	29
Figura 11. Flujos de lodo .....	17	Figura 33. Propiedades de la distribución Normal .....	30
Figura 12. Tendido del talud en relleno.....	17	Figura 34. Modelos de representación SIG. ....	31
Figura 13. Tendido del talud en corte.....	17	Figura 35. Red de primer orden de estaciones GPS para Costa Rica.....	32
Figura 14. Construcción de bermas .....	18	Figura 36. Ubicación geográfica del cantón de Oreamuno de Cartago. ....	34
Figura 15. Construcción de trincheras .....	18	Figura 37. Determinación de Criterios de Evaluación Geotécnica .....	36
Figura 16. Terraceo .....	18	Figura 38. Esquema del Índice de Desarrollo Social .....	37
Figura 17. Diques de tierra o roca .....	19	Figura 39. Esquema de topografía .....	39
Figura 18. Muro de Gaviones .....	19	Figura 40. Estructuras geológicas .....	40
Figura 19. Muro de Gravedad en concreto .....	20		
Figura 20. Muro de Encofrado o cribas .....	20		
Figura 21. Muro de tierra armada.....	21		
Figura 22. Muro de concreto reforzado. ....	21		

Figura 41. Mapa de intensidad de lluvias para un periodo de retorno de 25 años y distintos tiempos de concentración .....	44	Figura 60. Distribución de la Cercanía con los Asentamientos Humanos Oreamuno de Cartago .....	75
Figura 42. Esquema del planteamiento del Modelo de Priorización de Obras Geotécnicas .	47	Figura 61. Distribución de la Valoración de la topografía del Cantón .....	76
Figura 43. Esquema general del MPOG .....	49	Figura 62. Zona sobre de falla ruta 219 Oreamuno, Cartago .....	76
Figura 44. Esquema jerárquico de aspectos y criterios del MPOG .....	49	Figura 63. Distribución de la Valoración de la Cobertura del suelo.....	77
Figura 45. Formulario de Inspección Visual para Taludes y Laderas .....	53	Figura 64. Mapa de Zonificación de susceptibilidad a problemas geotécnicos (Oreamuno, Cartago) .....	80
Figura 46. Formulario de Inspección Visual para Estructuras.....	54	Figura 65. Modelo de Priorización Geotécnica sin Inspección (Oreamuno, Cartago).....	82
Figura 47. Ladera, Estación 1+154 .....	63	Figura 66. Modelo de Priorización Geotécnica de Obras de Infraestructura vial (Oreamuno, Cartago) .....	84
Figura 48. Estructura, Estación 1+575 .....	63		
Figura 49. Talud, Estación 1+605 .....	64		
Figura 50. Ladera, Estación 12+970 .....	65		
Figura 51. Talud, Estación 14+840 .....	65		
Figura 52. Zona de Estudio (Oreamuno, Cartago) .....	67		
Figura 53. Resultados de la Valoración del desarrollo del territorio (Oreamuno, Cartago) ...	68		
Figura 54. Resultados de la Valoración de cercanía con los asentamientos humanos .....	69		
Figura 55. Resultados de la Valoración de la topografía (Oreamuno, Cartago) .....	70		
Figura 56. Resultados de la Valoración de la precipitación máxima (Oreamuno, Cartago) .....	71		
Figura 57. Resultados de la Valoración de la Inspección de Obras Geotécnicas (Oreamuno, Cartago) .....	72		
Figura 58. Características de la Población consultada .....	74		
Figura 59. Distribución del desarrollo de Oreamuno de Cartago .....	75		

*“El conocimiento es como el fuego, que primero debe ser encendido por algún agente externo, pero que después se propaga por sí solo”*

*Ben Jonson*



# Prefacio

Los deslizamientos son una de las amenazas ambientales más destructivas que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada; sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control. (Suárez, 1998)

Según la Asociación centroamericana de Geotecnia en Costa Rica se ha avanzado en la apertura de caminos de forma poco planificada, pero logrando crear una red vial extensa, basada en el diseño geométrico y el trazado topográfico que muchas veces deja de lado aspectos geotécnicos los cuales producen problemas de estabilidad en carreteras. (ACG, 2010)

La conservación de esta red nacional está a cargo del CONAVI el cual por medio de planes quinquenales, el plan operativo institucional y planes trimestrales se encarga de mantener el estado adecuado las carreteras nacionales. Sin embargo no existe una manera cuantitativa de demostrar que estos planes se estén cumpliendo ya que ellos llegan a ser muy amplios.

Tal como lo plantea (Araya, 2012) el enfoque tradicional de gestión vial está dominado por las decisiones políticas antes que las técnicas, por ejemplo, la no consideración de los aspectos geotécnicos, lo cual ha traído consigo problemas tales como la pérdida de tiempo y dinero, la necesidad de grandes inversiones en mantenimiento y reparaciones, el consumo creciente de combustibles, el daño ambiental, la inseguridad de los usuarios de las vías y la mala imagen del país. (ACG, 2010)

Además, en general la gestión para la conservación y el mantenimiento de carreteras se efectúa tomando la infraestructura vial como un todo sin discernir entre sus partes (Drenajes y alcantarillas, señalización y elementos de seguridad, obras geotécnicas, superficie de ruedo, etc.) lo que dificulta mucho su gestión y muchas

veces se cae en el error de pensar que el mantenimiento es solamente a la superficie de ruedo dejando de lado los demás componentes desatendidos produciendo esto inversiones mayores a largo plazo.

A esto se debe sumar que realmente no existe un sistema de priorización basado en procedimientos previamente establecidos (un modelo de priorización) y menos a nivel geotécnico, por lo que en la mayoría de las veces la priorización queda sujeta al criterio del ingeniero de zona.

Según el CONAVI, el costo promedio anual, producto de los deslizamientos fue de aproximadamente ₡702.870.302 (entre el 2009 y el 2011) para los cuales, en la mayoría de los casos las obras geotécnicas se trataron como imprevisibilidades, o sea, como obras que se efectuaron de emergencia, por lo que se debieron invertir grandes cantidades de dinero para remediar los problemas presentados. (Consejo Nacional de Vialidad, 2011)

El “*modelo de priorización de obras geotécnicas (MPOG)*” pretende tomar los factores socio-económicos que permitan saber la importancia social y el impacto económico de las obras geotécnicas, los factores ambientales que determinen cuáles son las zonas más susceptibles a deslizamientos y los factores técnicos (in-situ) que permitan determinar el estado de los taludes, laderas y obras geotécnicas, con lo cual se pueda determinar un modelo para la gestión adecuada de las obras de ingeniería geotécnica, por tanto el objetivo del proyecto es desarrollar un modelo que permita priorizar la intervención y mantenimiento de obras geotécnicas de las carreteras.

Se extiende un sincero agradecimiento al CONAVI por el espacio brindado para poder desarrollar el proyecto, a todos los profesores de la UCR, del ITCR, entes privados y colaboradores que ayudaron para que este trabajo fuera posible.

# Resumen Ejecutivo

Actualmente la red vial de Costa Rica tiene una extensión aproximada de 35820 kilómetros lineales de los cuales aproximadamente el 21% lo conforman la red nacional y que están administrados por el CONAVI.



**Figura 1.** Red Pirámide de Costa Rica (Consejo Nacional de Vialidad C. , 2010)

Uno de los principales problemas y uno de los mayores retos en la administración de esta red es su debida planificación ya hay falta de herramientas que ayuden a planificar la conservación, intervención y mantenimiento de esta. Muchas veces las decisiones tienen fuertes influencias políticas dejando de lado aspectos sociales, económicos, ambientales y técnicos.

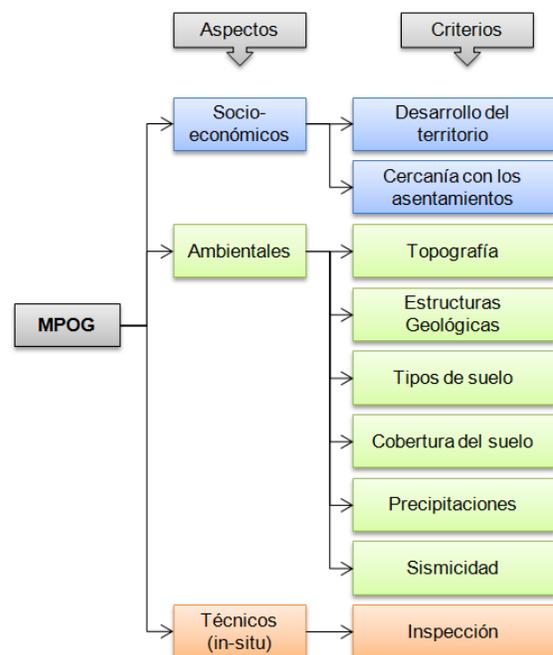
A esto se debe sumar que muchas veces se cae en el error de pensar en que el mantenimiento es solamente a la superficie de rueda dejando de lado los demás componentes desatendidos produciendo esto inversiones mayores a largo plazo.

El modelo de priorización de obras geotécnicas propone atender los aspectos geotécnicos de las obras viales dejando de lado los demás componentes del corredor vial. Con

este modelo se apoya la segregación de los componentes de la carretera de la carretera lo que permite estudiar cada uno de sus componentes por separado.

Mediante la investigación bibliográfica y la consulta de expertos se determinaron los factores socio-económicos que permiten saber la importancia social y el impacto económico de las obras geotécnicas, los factores ambientales que determinan cuáles son las zonas más susceptibles a deslizamientos y los factores técnicos (in-situ) que permiten determinar el estado de los taludes, laderas y obras geotécnicas, todo esto para que, por medio de la evaluación multicriterio se pudiera unir y determinar un modelo para la gestión adecuada de las obras de ingeniería geotécnica.

El árbol jerárquico del modelo se puede observar en la siguiente figura.



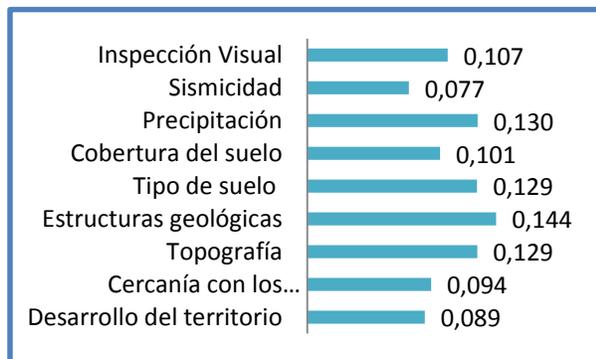
**Figura 2.** Árbol Jerárquico del MPOG (Fuente: el autor)

Cada uno de los criterios determinados para el modelo debían tener un peso en el modelo de priorización por lo que se realizó una consulta a expertos del área de conservación vial, geotecnistas, profesores investigadores y profesionales de áreas específicas de cada uno de los criterios, de manera que, por medio de una evaluación multicriterio pre-establecida se asignaran los pesos adecuados.

Luego de la consulta a expertos se procedió a la realización del análisis de los datos, con lo cual se determinó que los mismos cumplían con la distribución normal de probabilidad, esto determinó que tanto los datos como la población entrevista son representativos

Como metodologías de evaluación multicriterio se establecieron el uso de dos métodos específicos, el método CRITIC y el método de la Entropía donde la escogencia de estos métodos se fundamenta en que ellas no requieren de la asignación de pesos por parte del decisor y además toman la varianza de los resultados dentro de los cálculos permitiendo tomar una decisión no subjetiva por parte del evaluador. Finalmente la escogencia del método de evaluación más adecuado se estableció por medio de la distancia de Manhattan (Zeleny, 1982) la cual determinó cual es el método más apropiado para el estudio.

Para el modelo establecido se determinó que la metodología de evaluación multicriterio más adecuada era el Método de la Entropía, donde los resultados se muestran en la siguiente figura:



**Figura 3.** Pesos para cada uno de los criterios (Fuente: el autor)

Como parte de la aplicación del modelo se realizó una inspección visual de campo para lo cual se construyeron formularios de inspección visual para dos casos. El primero, en caso de no

existir estructuras construidas, solamente taludes y laderas. Y el segundo en caso de encontrar obras geotécnicas. Sea cual fuera el caso, lo que se perseguía con esta inspección visual es poder valorar visualmente los taludes, las laderas y las obras geotécnicas y así, según patologías, daños o posibles problemas geotécnicos que presenten, poder asignarles una debida importancia de intervención y mantenimiento.

Se tuvo que consultar diversas fuentes de información a saber: el Ministerio de Planificación y Políticas Económicas (MIDEPLAN), el Plan Regulador Urbano del Gran Área Metropolitana (PRUGAM), El Instituto Geográfico Nacional (IGN), La comisión Nacional de Emergencias (CNE), proyectos de Ingeniería Civil, y el Atlas digital de Costa Rica (ITCR, 2008) elaborado por la escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, profesores, profesionales del CONAVI, profesionales de instituciones privadas, etc.

Con la ayuda de sistemas de información geográfica (SIG) se procedió a procesamiento, análisis y unión de la información con lo cual se pudo determinar el modelo de priorización de obras geotécnicas MPOG para la zona de Oreamuno de Cartago (zona de estudio) siendo los SIG parte fundamental de la aplicación del modelo.

Como resultado de la aplicación del modelo de priorización al Cantón de Oreamuno se determinó que, en general, la zona tiene una susceptibilidad media a problemas geotécnicos y un nivel de priorización de obras geotécnicas moderada con algunas patologías que deben ser tratadas.

El modelo de priorización de obras geotécnicas es una herramienta muy útil en los procesos análisis a nivel de red de obras geotécnicas, para así poder planificar el mantenimiento y la intervención adecuada de laderas, taludes y obras que presenten daños y puedan afectar el adecuado tránsito y seguridad de los vehículos que transitan por las carreteras. Además se insta a que se desarrollen más investigaciones en área que colaboren con los procesos de planificación.

# Introducción

Costa Rica ha desarrollado una extensa red vial que atraviesa todo el territorio a sabiendas de que el país se encuentra en una zona tropical y que por sus características geomorfológicas, condiciones ambientales y demás, es una zona muy susceptible a sufrir problemas de deslizamientos. Costa Rica generalmente, reúne cuatro de los elementos más importantes para la ocurrencia de deslizamientos como lo son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas. A esto se deben sumar los grandes movimientos de tierra que se efectúan para los desarrollos de proyectos viales y que conllevan problemas de estabilidad. (Suárez, 2009)

En Costa Rica las carreteras se dividen en carreteras nacionales y carreteras cantonales, de las cuales las primeras están gestionadas por el CONAVI y las segundas están a cargo de las municipalidades y el MOPT. (Ley 5060)

Según el CONAVI, el costo promedio anual, producto de los deslizamientos fue de aproximadamente ₡702.870.302 (entre el 2009 y el 2011) los cuales se trataron en su totalidad como imprevisibilidades. (Consejo Nacional de Vialidad, 2011)

El enfoque tradicional de gestión vial toma las carreteras como un todo sin discernir sus componentes y haciendo énfasis en el mantenimiento únicamente de la superficie de ruedo. Es por ello que este modelo, intentando romper con ese paradigma, estudia únicamente la parte geotécnica de las obras de infraestructura vial dejando de lado otros componentes de la carretera como lo son la superficie de ruedo, las obras de seguridad, obras de drenaje, etc. Con esto se busca poder hacer una gestión de cada una de las partes y cambiar este modelo tradicional. (Araya, 2012)

La priorización de inversiones es un proceso difícil, por un lado, se deben contemplar

gran cantidad de variables, y por otro lado, existe un gran peso político en las decisiones, lo que hace aún más difícil la gestión adecuada que asigne los recursos adecuados en los tiempos adecuados sin llegar a acrecentar los problemas geotécnicos que se puedan presentar.

El Modelo de priorización de obras geotécnicas desarrollado tomó en cuenta aspectos socio-económicos, ambientales y técnicos (o in-situ) los cuales por medio de una evaluación multicriterio se integraron para finalmente dar con un resultado acorde a las necesidades requeridas.

Este modelo se concluye con 9 criterios derivados de los 3 ejes principales mencionados anteriores y para la implementación de este modelo se hizo uso de herramientas de información geográfica y como productos adicionales se logra implementar 2 formularios para futuro inventariado de infraestructura geotécnica la cual brinda información muy valiosa para la institución.



# Objetivos

## Objetivo General

- Definir un modelo de gestión para la priorización de obras geotécnicas de la infraestructura vial, para la optimización en la intervención y mantenimiento de las mismas.

## Objetivos Específicos

- Generar el modelo de priorización de obras geotécnicas con base en sistemas de información geográfica (SIG).
- Aplicar el modelo, dentro del cantón de Oreamuno de Cartago.
- Identificar cuáles son los elementos críticos a tomar en cuenta en el modelo de priorización.
- Crear propuestas para la evaluación visual de las obras geotécnicas existentes para el inventario e inspección.
- Realizar un procedimiento detallado para la evaluación del modelo de priorización a realizar.
- Realizar una propuesta para futuras actualizaciones del modelo

# Gestión de Infraestructura Vial

## Infraestructura Vial

La infraestructura vial es un conjunto de elementos destinados a brindar a los usuarios un transporte de un punto a otro de manera segura, confortable, de mínimo costo, de mínimo tiempo de viaje y con el mínimo impacto ambiental.

Por tanto la infraestructura vial no es solo el pavimento, sino también:

- Linderos, derecho de vía y provisiones para futuras ampliaciones.
- Zonas verdes
- Drenajes y alcantarillas
- Iluminación
- Señalización y demás elementos de seguridad vial.
- Obras de contención de taludes y laderas (obras geotécnicas)
- Puentes, tanto vehiculares como peatonales.
- Espaldones
- Superficie de ruedo
- Vías peatonales (aceras) y los carriles para bicicletas.
- Zonas de servicio (combustible, ventas de repuestos, restaurantes, sanitarios, entre otras)

De los cuales:

- **Derechos de vía:** el cual es el terreno definido por la administración de los sistemas viales como parte del proyecto, el cual debe ser libre en toda la longitud de la vía, ya que aunque es territorio público, es de libre tránsito y por ley no debe ser invadido para obras de otro tipo.
- **Los drenajes y alcantarillas:** los cuales escurren el agua que llega a la superficie de los pavimentos, o desvían el agua antes de llegar ahí y con ello disminuyen la erosión. de los mismos por al escorrentía directa, la posibilidad de deslizamientos de masas de tierras y

desde luego disminuyen la cantidad de agua que pueda invadir la carpeta de rodamiento.

- **Señalización vial:** la señalización es uno de los elementos principales de una obra vial. El objetivo de esta es reglamentar, prevenir e informar. La señalización vial se da de forma vertical y horizontal.
- **Obras de contención de taludes y laderas (obras geotécnicas):** las cuales juegan un papel fundamental, ya que no tiene ningún sentido construir una vía para tenerla cerrada un alto porcentaje del tiempo por problemas de deslizamientos. Cuando se dan fallas de taludes de corte o relleno, generalmente se tienen grandes pérdidas, tanto en infraestructura, como en gastos operativos, pues en esta condición es requerido el cierre de la vía, lo cual es sumamente perjudicial cuando se habla de rutas primarias o de alto tránsito.
- **Superficie de ruedo:** Es el elemento por el que transitan los vehículos. Esta superficie debe tener lisura, para garantizar la comodidad del usuario y suficiente fricción que de seguridad en las maniobras al conducir. Cabe destacar que muchos de los índices de medición de confort en una vía están elaborados en término de variables generadas por la superficie de ruedo.

## Sistema de gestión de infraestructura

No basta diseñar y construir adecuadamente una carretera, hay que asegurar que el comportamiento en su vida útil esté dentro de las consideraciones de diseño y que las

modificaciones realizadas durante la construcción sean valorizadas adecuadamente. (Escobar, 2006)

Los sistemas de gestión de carreteras son el conjunto de operaciones que tiene por objetivo conservar adecuadamente y por un determinado periodo, una carretera o una red vial en condiciones apropiadas de seguridad, comodidad, capacidad estructural, bajo las condiciones ambientales locales, minimizando los costos monetarios, sociales y ecológicos.

Una gestión responsable administra todo el conjunto de elementos de la obra para brindar el mejor servicio al usuario. Por lo tanto, la gestión no debe estar dirigida a conservar únicamente la superficie de ruedo, sino en general las condiciones para el usuario. (Orozco, 2007)

Según Flintsch y Medina la Gestión vial *“Consiste en un proceso sistemático que provee, analiza y resume información relacionada con la infraestructura de manera de que pueda ser utilizada en la selección e implementación de programas de construcción, rehabilitación y mantenimiento de la infraestructura económicamente efectivos”* (Flintsch & Medina, 2010)

Para los cuales se establecen 3 niveles para la toma de decisiones:

- **Gestión a Nivel de proyecto (Project):** Donde se toman Decisiones sobre proyectos en particular, con información muy detallada y se hacen diseños definitivos del tratamiento.
- **Gestión a nivel de red (Network):** Donde básicamente se toman decisiones administrativas relacionadas con las políticas y programas a aplicar al sistema de pavimentos (en el cual este proyecto toma lugar).
- **Gestión a nivel estratégico:** Establecido para planes a mediano-largo plazo (Flintsch & Medina, 2010)

Por esta razón se debe contar con herramientas capaces de informar en todo momento del comportamiento no solo del pavimento, sino, de todos los componentes de la infraestructura vial.

Estas herramientas permiten contar con la información necesaria del comportamiento para programar y planificar las estrategias a seguir para mantener una red de carreteras en niveles de servicio adecuados, fortaleciendo así el desarrollo integral del país.

Dentro de de los componentes básicos de un Sistema de Gestión de Pavimentos están las etapas de:

- Conservación.
- Rehabilitación.
- Evaluación.
- Investigación.

Por sí solos estos componentes no significan mucho por lo que deben interactuar para permitir dar el seguimiento adecuado al comportamiento de un diseño. (Sub-Saharan Africa Transport Policy Program, 2008)

## Etapa de Investigación

Esta etapa considerada como de retroalimentación valoriza las causas probables de un comportamiento no adecuado de un diseño.

Su campo de acción se amplía cuando a través de ella se realizan estudios de nuevos materiales, técnicas de construcción, etc., por lo que es fundamental llevarla a cabo como un proceso de mejora continua dentro del sistema de gestión del mantenimiento, o bien de no ser posible, por circunstancias de orden técnico o de recursos, se deberán establecer los canales sobre fuentes de información por medio de las cuales se pueda estar en contacto con procesos y tecnologías de punta que puedan ser implementados en la conservación y rehabilitación de la red de caminos. (Dahlhaus Parkman, 2002)

## Priorización de inversiones

La priorización de las inversiones permite un adecuado uso de los recursos, realizando las intervenciones en las zonas que realmente lo necesitan en el momento oportuno.

Generalmente la selección de que obras se deben realizar, donde realizarlas, y la prioridad de ellas involucra intereses de índole político y social, lo cual dificulta el importante trabajo técnico, necesario para su planificación, ejecución, control y evaluación por lo que es de suma importancia proveer a las instituciones encargadas de la conservación vial de herramientas que les permita tomar decisiones de inversión basadas en aspectos técnicos, sociales, ambientales y económicos, ya que esto se transformara en:

- Disminución de costos de transporte: ya que un camino en buen estado posibilita un mayor desarrollo socioeconómico y el costo de la transportación. una disminución en los costos de transporte de los usuarios, un camino en buen estado posibilita un mayor desarrollo socioeconómico.
- Ahorro de materiales: una adecuada conservación disminuye el consumo de materiales producto de la rehabilitación. (Flintsch & Medina, 2010)

## Inventario de la Condición Vial

Para garantizar una adecuada planificación y desarrollo de la conservación es necesario tener un conocimiento de la red y su evolución, conociendo su estructura, estado y evolución (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

El inventario de condición vial determina los tipos y magnitudes de deterioros presentes en la carretera. De esta manera se determinan las acciones necesarias para garantizar una adecuada conservación, y así se puede realizar la programación anual de obras e intervenciones requeridas para el año presupuestal, definiendo la inversión que se requiere realizar en dicho período. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008)

## Conservación vial a nivel mundial

A nivel internacional existen diversos modelos utilizados para la gestión y conservación vial dentro de los cuales se pueden mencionar:

- Highway Development and Management Model (HDM)
- Integrated Rural Accessibility planning (IRAP)
- Performance Assessment Model (PAM)
- Participatory Rural Appraisal (PRA)
- Road Economic Decision Model (RED)
- Road Network Evaluation Tools (RONET)
- Road User Charges Model (RUC)
- Sustainable Livelihood Approach (SLA)
- Etc.

Cada uno de ellos tiene sus metodologías para poder asignar los recursos necesarios que garanticen el estado óptimo de la infraestructura vial para el cual Costa Rica ha intentado optar por una modificación de la metodología HDM.

## Conservación vial en Costa Rica

La conservación vial es el conjunto de actividades destinadas a preservar de forma continua y sostenida el buen estado de las vías, a través del tiempo para preservar la condición operativa, el nivel de servicio y seguridad de las vías, que garantice un óptimo servicio al usuario. En Costa Rica la conservación vial comprende de actividades tales como:

- Mantenimiento rutinario y Periódico,
- Rehabilitación,
- Refuerzo de la superficie de ruedo sin alterar la estructura existente.



**Figura 4.** Componentes principales de la conservación vial. (Barquero, 1998)

Las definiciones más importantes dentro del marco de conservación vial son:

- **Mantenimiento rutinario:** Es el conjunto de labores de limpieza de drenajes, control de vegetación, reparaciones menores y localizadas del pavimento y restitución de la demarcación, que se deben de efectuar de una manera continua y sostenida, a través del preservar la condición operativa y el nivel de servicio y de seguridad de las vías (Barquero, 1998)
- **Mantenimiento periódico:** Es el conjunto de actividades programables cada cierto período (de 1 a 3 años, según

corresponda), tendientes a renovar la condición original de los pavimentos mediante la aplicación de capas adicionales de lastre, grava, tratamientos superficiales o recarpeteos asfálticos, según sea el caso, sin alterar la estructura de las capas del pavimento subyacente (Barquero, 1998)

- **Rehabilitación:** Es restablecer el nivel de servicio de una estructura, llevándolo a su estado original. Además puede incluir, por una única vez en cada caso, la construcción o reconstrucción del sistema de drenaje, que no implique la construcción de puentes o alcantarillas mayores (Barquero, 1998)

La conservación vial NO comprende la construcción de vías nuevas o partes de ellas, ni la reconstrucción, ni tampoco el mejoramiento de vías las cuales se pueden definir como:

- **Construcción de obras viales nuevas:** Construcción de todas las obras viales que se incorporen a la red nacional existente.
- **Reconstrucción:** La renovación completa de la estructura del camino, con previa demolición parcial o total de la estructura del pavimento. **Mejoramiento:** Mejoras o modificaciones de estándar horizontal o vertical de los caminos. También incluyen ampliación de calzada, elevación del estándar del tipo de superficie (tierra, lastre, asfalto, otros), construcción de alcantarillas grandes, puentes o intersecciones.

(Barquero, 1998)

Dentro de la filosofía de conservación de carreteras del país se procura que:

- Conservación adecuada y con continuidad de la red vial a un costo razonable.
- Mantenimiento con perspectiva de largo plazo.
- Optimización de la relación costo-beneficio del sistema de transporte por carretera (que no es lo mismo que procurar gastar lo mínimo en los caminos)

- Racionalización del uso de los recursos.
- Reducción al máximo de los efectos dañinos para el medio ambiente
- Efectuar los trabajos de conservación en el momento preciso.
- Anticipar las labores de conservación o postergarlas a un tiempo diferente del óptimo técnico, tiene un alto costo económico.
- Aplicar una política de conservación sana representa ahorrar ingentes recursos, que serían útiles para el mejor desarrollo de la red vial

Además se sabe que:

- El atraso, tanto en el refuerzo como en el mantenimiento rutinario, produce daños en la estructura básica del camino
- Cuando se posterga la conservación, el deterioro de la superficie de rodadura trae como consecuencia el aumento de los costos de operación de los vehículos y las necesidades de rehabilitación

# Geotecnia Vial

# Obras Geotécnicas

Dentro del corredor vial las obras geotécnicas comprenden todas aquellas obras en las que haya una interacción directa o indirecta de la obra civil (infraestructura en sí) con el medio ambiente.

Dentro de este tipo de obras podemos encontrar:

- Estructuras de contención tales como muros de gravedad rígidos, semirrígidos y flexibles.
- Pantallas las cuales son estructura de contención flexible.
- Reconformación y estabilidad de taludes.
- Cimentaciones superficiales
- Cimentaciones Profundas
- Obras de protección
- Taludes conformados
- Obras de drenaje de laderas y taludes
- Anclajes
- Túneles

## Taludes y Laderas

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana sino que posee pendiente o cambios de altura significativa aunque en literatura técnica se define como ladera cuando su formación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente.

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antropológico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

Los taludes son uno de los elementos que potencialmente genera una mayor cantidad de pérdidas operativas en las rutas, ya que un deslizamiento causa además de las reparaciones de la vía (remoción del material deslizado, reconstrucción del pavimento y obras auxiliares) pérdidas en tiempo de los conductores, materiales que se transportan, encomiendas, pérdidas por la salida de aviones y barcos con productos de

importación y exportación, y lo más grave en muchos casos pérdidas humanas.

Las dos causas de mayor incidencia para la activación de deslizamientos de taludes son los movimientos sísmicos y la humedad excesiva en el suelo, por lo que está ligada de forma directa a las precipitaciones y por tanto la mayor cantidad de movimientos de tierra se dan condiciones de época lluviosa.

Otro punto de gran importancia en los taludes es la erosión. Esta se da en mayor grado en los taludes de relleno que se puedan generar posteriormente a la construcción del proyecto vial. En este punto además de las obras de contención se tiene también las obras de protección, las cuales permiten tener el talud estable ante la erosión. Cuando se da la erosión en un talud sobre el nivel de la vía se generan flujos de sedimentos y otros materiales que se lavan de las laderas, los cuales generan obstáculos en las cunetas y alcantarillas, promoviendo así otro problema. (Olivera F. , 1996)

La gestión de taludes es uno de los elementos que muchas veces se deja de lado en las vías. En este sentido, se debe tener consideración de que zonas con topografía irregular (rutas de montaña) y que estén expuestas constantemente a las lluvias, poseen un elevado potencial de deslizamiento. En esto juegan un papel muy importante los drenajes los cuales evitarán la erosión de los mismos y disminuyen el potencial de deslizamientos, ya que eliminan la humedad. (Orozco, 2007)

## Señales de Movimiento de Taludes

En general existen señales visuales que denotan el movimiento de las laderas dentro de las cuales se pueden mencionar:

- **Grietas de tracción en la carretera o en los taludes:** Permiten la infiltración del agua y por tanto reducción de la

resistencia por la generación de presiones de poros adicionales.

- **Hundimiento de sub-rasante:** Los hundimientos verticales de la calzada pueden indicar movimientos de reptación de la ladera o el desarrollo de inestabilidad en el talud inferior.
- **Detritos en la vía:** Pueden generarse directamente en el sitio de desintegración de la roca y ser transportados y depositados en otros sitios por las corrientes de agua.
- **Abultamiento sobre o bajo la carretera:** Abultamientos hacia la pata del talud son indicios de masa deslizada que se ha acumulado.
- **Cambios de forma:** Desviaciones de árboles, líneas eléctricas, postes de teléfono y cercados tensionados o inclinados son indicadores de movimientos del terreno.
- **Deformación de estructuras adyacentes:** Afectación de estructuras como puentes, edificaciones o muros de contención. En puentes prestarse atención a inclinaciones de los estribos o asentamientos de las losas de aproximación. En edificaciones dependiendo de su ubicación puede presentarse agrietamiento de muros de mampostería, cimentaciones, levantamientos o hundimientos. Finalmente en estructuras de contención puede observarse pérdida de verticalidad o algún agrietamiento debido a empujes de la masa deslizada.
- **Drenaje deficiente de agua superficial:** Estancamiento de aguas, agrietamiento de cunetas, alcantarillas bloqueadas, descargas de flujos hacia zonas desprotegidas de los taludes.
- **Drenaje deficiente de agua subsuperficial:** Presencia de nacimientos en o hacia el pie de taludes, cambios de color en el suelo (indicando cambios en el contenido de humedad), zonas de terreno blando, crecimiento de vegetación como evidencia de flujo subsuperficial.
- **Erosión:** Problemas de socavación, formación de surcos o cárcavas.

(Grupo Técnico INVIAS, 2006)

# Susceptibilidad a deslizamientos

Existen varias metodologías para determinar la propensión a deslizamientos, dentro de las cuales se pueden mencionar:

- **Evaluación directa:** Mediante reconocimiento en el campo o por medio de fotointerpretación detallada la cual es utilizada a escalas media y grande.
- **Modelos cartográficos:** que por medio de la superposición de mapas que representan los distintos factores. Cabe destacar que este tipo de métodos es apropiado para escalas pequeñas a medias.
- **Métodos probabilísticos:** que son métodos parecidos a los cartográficos con la salvedad de que se determina la frecuencia de los factores activos tales como el sismo. Los mismos son apropiados para escala media.
- **Métodos deterministas:** los cuales se basan en el cálculo de la estabilidad de las laderas en un sitio en particular y son aptos para una gran escala únicamente.  
(Barrantes, Barrantes, & Nuñez, 2011)

Aunque existen múltiples manera para la determinación a la susceptibilidad a deslizamientos, en Costa Rica y en general en Centroamérica se utiliza mucho el método Mora-Vahrson del cual se hace mención ya que algunas escalas de valoración se toman de esta metodología de evaluación.

## Método Mora-Vahrson

Este método permite realizar un análisis a priori de áreas extensas bajo amenaza de deslizamientos, utilizando factores tales como relieve relativo, litología, humedad, sismicidad y lluvia, todo esto definido por índices de influencia para cada área. (Mora R. , 2004)

El mismo se basa en modelos cartográficos, fue desarrollado en Costa Rica y actualmente es ampliamente utilizado en América Central.

A través de esta metodología se obtiene una zonificación de áreas susceptibles mediante la combinación de variables, para las cuales se establecen índices que reflejan el peso relativo de cada uno de los parámetros. Entre las virtudes que presenta esta metodología es su fácil ejecución mediante un sistema de información geográfica (SIG).

La metodología resulta apropiada para su aplicación a países en vías de desarrollo, debido a que requiere de pocas variables y su aplicación es relativamente sencilla. No obstante incluye los factores más significativos desde el punto de vista de la inestabilidad de las laderas y se basa en parámetros que pueden determinarse de manera ágil y económica en el campo y mediante trabajo de gabinete. (Barrantes, Barrantes, & Núñez, 2011)

El método Mora-Vahrson (Mora et al., 1992) es de tipo heurístico, específicamente una combinación cualitativa de mapas. Se aplica mediante la combinación de varios factores y parámetros, los cuales se obtienen de la observación y medición de indicadores morfodinámicos y su distribución espacio-temporal. La combinación de los factores y parámetros se realiza considerando que los deslizamientos ocurren cuando en una ladera, compuesta por una litología determinada, con cierto grado de humedad y con cierta pendiente, se alcanza un grado de susceptibilidad (elementos pasivos). Bajo estas condiciones, los factores externos y dinámicos, como son la sismicidad y precipitaciones (elementos activos), actúan como factores de disparo que perturban el equilibrio, la mayoría de las veces precario, que se mantiene en la ladera.

La justificación de este método se basa en la efectiva determinación de zonas de susceptibilidad geotécnica de diversos estudios, entre ellos (Barrantes, Barrantes, & Núñez, 2011) concluyen que la zonificación de deslizamientos con la metodología Mora-Vahrson resulta tener suficiente precisión para establecer la susceptibilidad a deslizamientos a escala media, afirmación que puede sustentarse en la comparación entre los deslizamientos ocurridos en algunas zonas y las áreas de peligro establecidas con la metodología.

Para el caso de estudio de priorización geotécnica es importante la revisión de este método ya que existe un vínculo directo entre el trabajo a realizar y el método Mora-Vahrson,

además es importante ya que de este método se tomarán algunas escalas de valoración.

## Tipos de movimiento

### Caídas

Movimiento de masas rocosas de cualquier tamaño que se desprenden de un talud empinado o un acantilado sobre una superficie que no ocurren deslizamientos, descendiendo principalmente a caída libre, saltos, rodados. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)

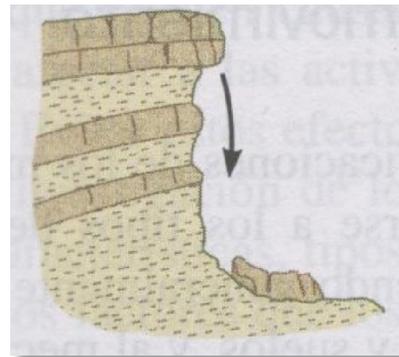
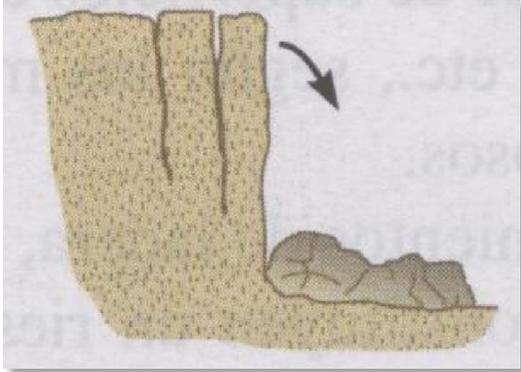


Figura 5. Caídas (Gonzales De Vallejo, 2002)

### Volcamientos

Rotación hacia delante de una unidad o varias, con respecto a un punto en su parte inferior, por acción de la gravedad. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)

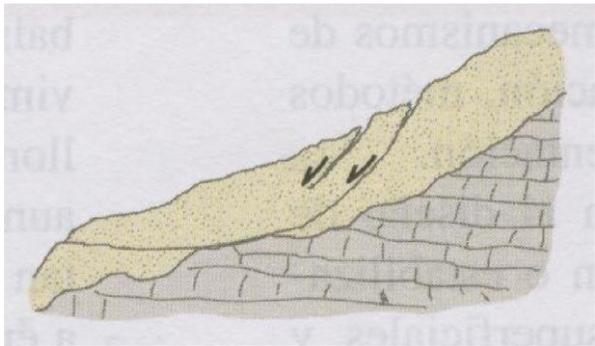


**Figura 6.** Volcamientos (Gonzales De Vallejo, 2002)

## Deslizamientos

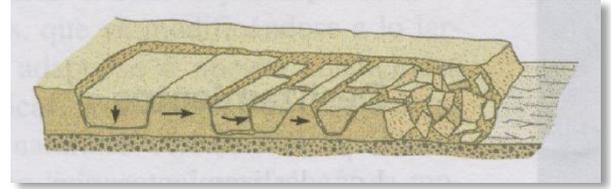
Consiste en deformación por corte y desplazamientos. Se dividen en deslizamientos rotacionales y traslacionales:

- **Movimientos rotacionales:** el movimiento en esencia de rotación alrededor de un eje paralelo al talud, generalmente en suelos cohesivos de gran espesor como coluviones, capas arcillosas gruesas, rellenos, terraplenes y botaderos. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)



**Figura 7.** Deslizamientos rotacionales (Gonzales De Vallejo, 2002)

- **Movimientos traslacionales:** Consiste en movimiento de cualquier tipo de material a lo largo de superficies casi planas, conformadas por discontinuidades de cualquier tipo, ya sea estratificación, diaclasamiento, perfil de meteorización. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)

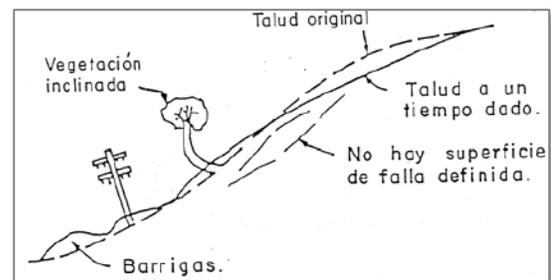


**Figura 8.** Deslizamientos traslacionales (Gonzales De Vallejo, 2002)

## Flujos

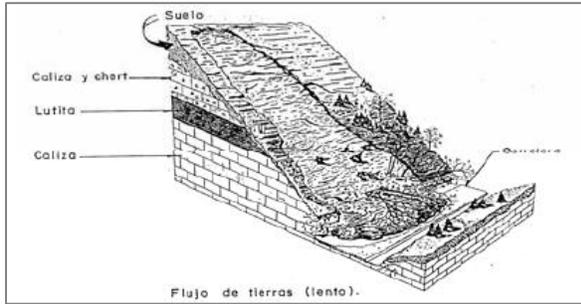
Según (Varnes, 1978) es un movimiento espacialmente continuo en el que la distribución de velocidades dentro de la masa se asemeja a la de un líquido viscoso. A continuación los distintos tipos de flujos:

- **Movimientos lentos, de reptación o flujo plástico:** movimiento muy lento, aún en taludes con pendiente moderada y con cobertura vegetal. Se evidencia por deformación del terreno, formación de pliegues en las formaciones rocosas, inclinación de árboles, separación del suelo en contacto con grandes rocas, corrimiento de líneas férreas, tensionamiento de cercas y raíces de árboles. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)



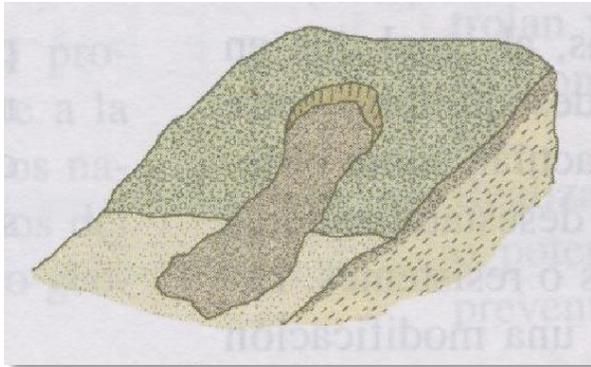
**Figura 9.** Movimientos de reptación (García, 1996)

- **Flujos de detritos y flujos de tierra:** se forman en suelos o materiales provenientes de meteorización de las rocas, que pierden su estabilidad por efecto del agua, originando desplazamientos por formas alargadas, lobuladas en su extremo inferior. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)



**Figura 10.** Flujos de detritos y tierra (García, 1996)

- **Flujos de lodo:** se forman cuando una masa de detritos pierde resistencia por acción del agua hasta tener una consistencia blanda y fluida, generándose movimientos rápidos, dependiendo de la intensidad y duración de las lluvias y de la pendiente del terreno. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)



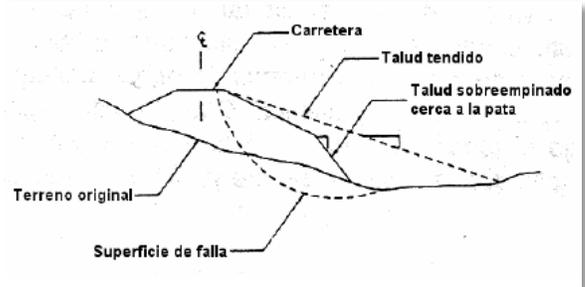
**Figura 11.** Flujos de lodo (Gonzales De Vallejo, 2002)

# Soluciones Geotécnicas

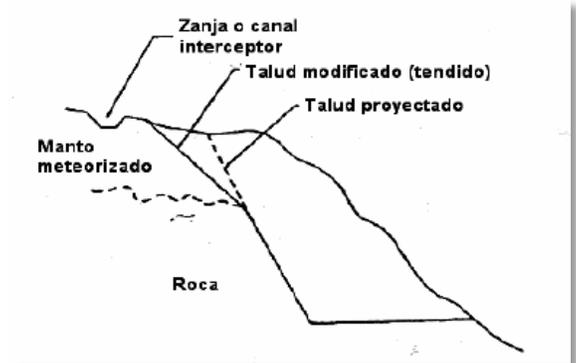
## Reconformación

Se refiere al cambio en la geometría del talud el cual pretende brindar estabilidad. Dentro de las principales técnicas de reconformación se encuentran:

- **Tendido del talud:** Empleado para reparar deslizamientos pequeños en materiales meteorizados. También en excavaciones de cortes nuevos, con carácter preventivo, o como correctivo de deslizamientos incipientes. Sin embargo, puede resultar inconveniente si no acompañan de las medidas de protección pertinentes para proteger los materiales que quedan expuestos. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)



**Figura 12.** Tendido del talud en relleno (García, 1996)



**Figura 13.** Tendido del talud en corte (García, 1996)

- **Construcción de bermas de suelo y roca en el pie del talud:** Empleado como contrapeso en pie del talud fallado. Son efectivos en fallas rotacionales profundas para reparar pequeños deslizamientos en los que la pata está sobre empinada.

En el caso de las construcciones de bermas una de las ventajas es la reducción del volumen y velocidad de la escorrentía, reducción en erosión e infiltración. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)

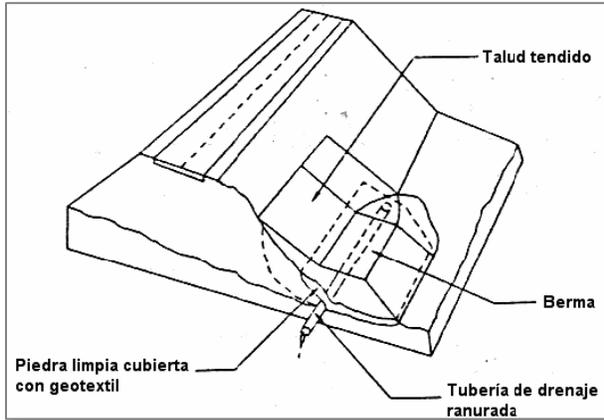


Figura 14. Construcción de bermas (García, 1996)

- **Construcción de trincheras estabilizantes:** Ese tipo de obras mejoran las condiciones de estabilidad del terreno y frecuentemente son un buen complemento a los taludes tendidos y las bermas.

Después de excavar el material inestable, se abren zanjas, las paredes y el fondo se cubren con geotextil, se rellena la trinchera y se coloca nuevamente geotextil en la parte superior antes de colocar el suelo del talud. Las trincheras deben extenderse sobre toda la longitud de falla y deben emplearse roca no degradable, la cual debe compactarse en espesores máximos a 0.6m y no debe contener más del 5% de material que pasa tamiz 200, en que caso que se emplee como capa drenante. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)

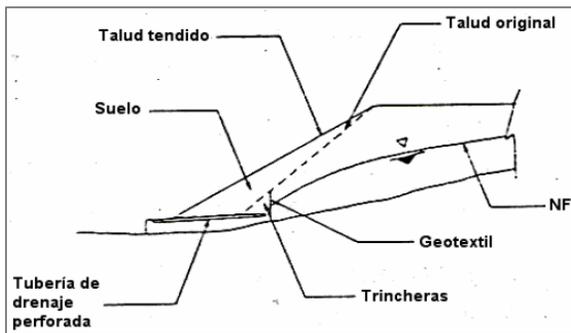


Figura 15. Construcción de trincheras (García, 1996)

- **Terraceo:** Se aplica a taludes empinados en los que el tendido resulte complicado ayudando a controlar la erosión y a retener detritos de pequeños deslizamientos. El talud debe reconfigurarse de manera que el agua de escorrentía sea recolectada y conducida fuera del área potencialmente inestable. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)

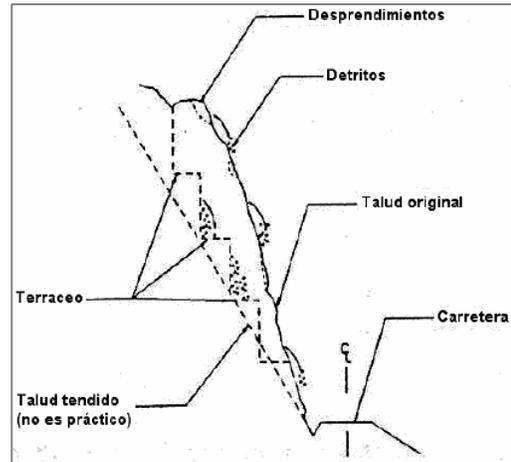


Figura 16. Terraceo (García, 1996)

## Estructuras de contención

Las estructuras de contención se utilizan para corregir fallas de taludes en obras lineales incrementando las fuerzas resistentes. También se usan en el pie de la masa deslizada en el caso de pequeñas masas en movimiento; debe dorárseles de un buen drenaje y cimentarlos donde no haya posibilidad de remoción del suelo de fundación.

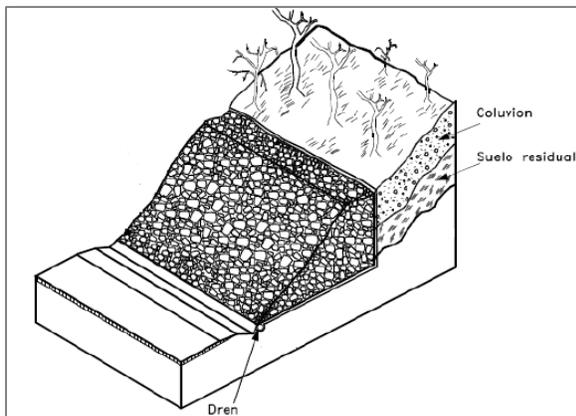
Según (García, 1996), las funciones de las estructuras de contención son:

- Controlar deslizamientos de pequeñas dimensiones
- Controlar deslizamientos en el pie de taludes empinados
- Disminuir la extensión de la falla en grandes masas
- Soporte inicial en taludes tendidos o de rellenos para berma
- Limitar el derecho de vía o sitios de préstamo de materiales.

Dentro de las estructuras de contención se pueden mencionar.

- **Diques de tierra o roca:** Son estructuras que soportan las presiones de tierra por medio de su propio peso.

La función de ellos es proveer de soporte a una masa de suelo o roca, que ha sido cortada o para ser rellenada. Estas estructuras pueden cumplir funciones como la retención de suelo y roca, sistema de soporte a excavaciones. También son usados en la corrección de deslizamientos rotacionales de suelos y rocas de poca altura (menos de 4m) y en la corrección de deslizamientos traslacionales de tipo laminar en suelos, involucrando materiales como arcillas. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)



**Figura 17.** Diques de tierra o roca (Suárez, 1998)

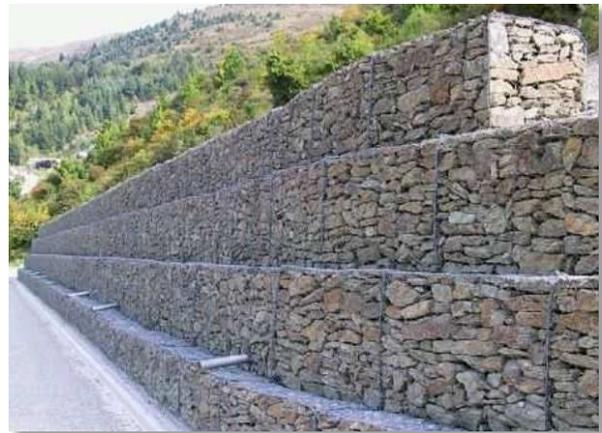
- **Muros de Gaviones:** Consiste en unidades de forma paralelepípeda en malla de alambre galvanizado, que se llena con fragmentos de roca dura. Los gaviones son estructuras que deben comportarse como estructuras flexibles capaces de soportar grandes deformaciones sin perder su capacidad estructural. Los factores que influyen en la flexibilidad de estas estructuras son:
  - Geometría y dimensiones de la malla
  - Propiedades mecánicas del alambre
  - Tamaño y forma de las piedras de relleno
  - Número de tirantes y diafragmas
  - Dimensiones del gavión.

Según García (1996), los muros de gaviones son efectivos en:

- Situaciones donde es importante el control de erosión y deben

considerarse como parte de los diseños de bermas y taludes tendidos adyacentes a ríos y corrientes.

- Como medida correctiva en deslizamientos rotacionales en suelos y materiales residuales.
- Como elementos de corrección de deslizamientos traslacionales ocasionados por la pérdida de soporte de la ladera y los incrementos de esfuerzos o presión de poros.
- Proteger las orillas o el lecho de los ríos ante la socavación
- Contención de tierras y rellenos.
- Como medida preventiva en caídas de rocas y suelos.



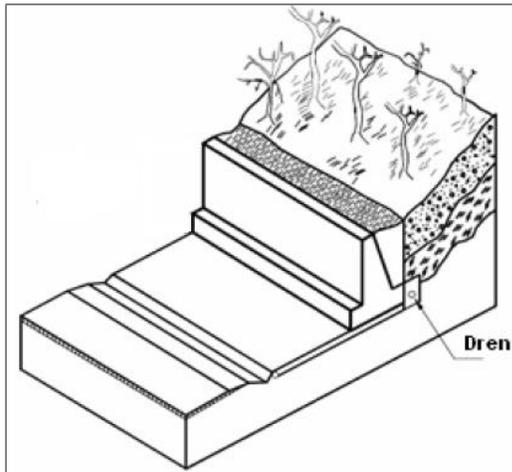
**Figura 18.** Muro de Gaviones (Fuente: el autor)

- **Muros de gravedad en concreto:** Son masas relativamente grandes de concreto o concreto con piedra las cuales trabajan como estructuras rígidas. Actúan como estructuras de gravedad por lo que no se recomienda su uso en alturas superiores a 6m debido al aumento de costos y a la generación de esfuerzos de flexión que no pueden ser resistidos por el concreto simple.

Los muros de concreto en todos los casos deben tener un sistema de drenaje para eliminar la posibilidad de presiones de agua.

Los muros de concreto deben cimentarse debajo de la superficie de falla con el objeto de obtener fuerzas de reacción por fuera del movimiento que aporten estabilidad del muro y del

deslizamiento. (Grupo Técnico INVIAS, 2006)

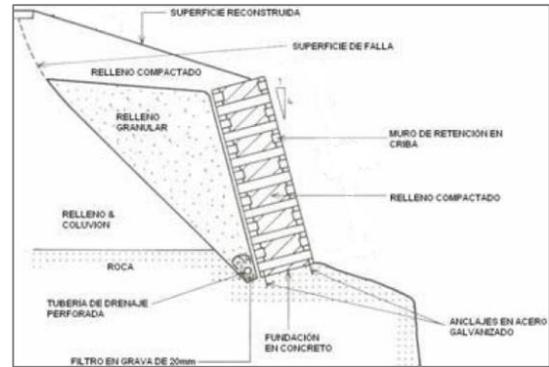


**Figura 19.** Muro de Gravedad en concreto (Suárez, 1998)

- **Muros de encofrado o cribas:** Es una estructura apropiada para reparar pequeños deslizamientos y prevenir socavación de los pies de los taludes. Está formado por la unión de un número de celdas juntas y llenas con suelo para obtener resistencia y peso como un muro de retención de gravedad, tiene la ventaja de permitir asentamientos diferenciales importantes.

Generalmente tiene aplicaciones:

- Como muro flexible de retención de masas de tierra
- En la corrección de deslizamientos rotacionales de poca altura en suelos y rocas por causas de litología débil, y en suelos como arcillas y suelos residuales.
- En la corrección de deslizamientos traslacionales de tipo laminar en suelos, involucrando materiales como arcillas.
- Prevención de socavación en la pata de taludes.



**Figura 20.** Muro de Encofrado o cribas (García, 1996)

- **Muros de tierra reforzada:** Estos muros se construyen alternando capas de suelo y material de refuerzo; este refuerzo está dado por capas de bandas metálicas o geo-sintéticos que sostienen elementos prefabricados que constituyen la cara de la estructura.

El sistema más popular de muros de tierra reforzada es el refuerzo de terraplenes con geo-textiles, en el cual el mecanismo de transmisión de esfuerzos es predominante de fricción. Un problema importante de los geo-textiles es su deterioro con la luz ultravioleta del sol y por eso se requiere que este material permanezca cubierto, con concreto emulsión asfáltica o suelo con vegetación. Los principales elementos de estas estructuras son: material de relleno, mallas de refuerzo, pared exterior del muro y conectores.

Dentro de las aplicaciones de estas estructuras es:

- Relleno de contra fuerte
- Como terraplén reforzado
- Como estructura de retención de tierras.

(Grupo Técnico INVIAS, 2006)



**Figura 21. Muro de tierra armada.** (Recuperado de <http://www.murolud.com>)



**Figura 22. Muro de concreto reforzado.** (Recuperado de <http://www.guiaconstruccion.net>)

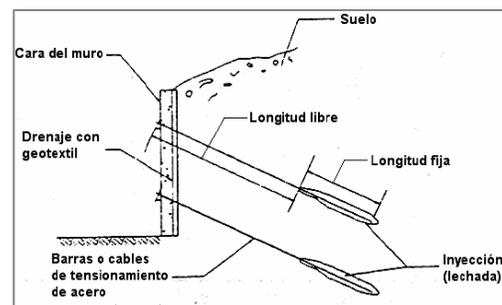
- **Muros de concreto reforzado:** Una estructura de concreto reforzado resiste los movimientos debidos a la presión de la tierra sobre el muro. El muro a su vez se apoya en una cimentación por fuera de la masa inestable.

En todos los casos los muros de concreto armado debe contener un sistema de drenaje detrás de su pared vertical o un sistema de lloraderos o salidas para el agua represada detrás de muro.

Dentro de sus aplicaciones están:

- Como estructura de contención, retención de tierras y soporte de excavaciones en laderas.
- Corrección de deslizamientos rotacionales de poca altura en suelos y deslizamientos traslacionales en suelos; involucrando materiales como arcillas y coluviones.
- Como estructura hidráulica en aliviaderos y en delimitación de canales  
(Grupo Técnico INVIAS, 2006)

- **Muros Anclados:** Los anclajes de tierra son elementos estructurales que se introducen en la masa de suelo o roca y actúan restringiendo el movimiento del muro de contención. Los principales elementos del muro anclado son:
  - Acero pre-esforzado
  - Longitud de anclaje
  - Longitud no anclada
  - Cabezal de anclaje



**Figura 23. Muro anclado** (García, 1996)

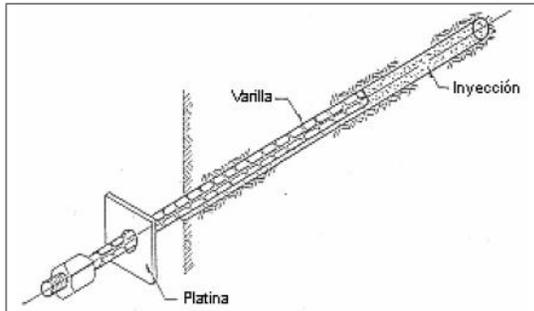
## Anclajes en suelo y roca

Se refiere a anclajes o tensores, pre-esforzados o no, que se emplean solos o en conjunto con estructuras de contención.

Entre los distintos tipos de anclajes a suelo y rocas se encuentran:

- **Anclajes en roca:** Se emplea en el control de deslizamientos en roca. Para fijar losas de espesor moderado, se pueden utilizar anclajes pasivos tales como los pernos en roca inyectados en toda su longitud. Otra

aplicación consiste en asegurar grandes bloques en taludes de suelos residuales o en coluviones densos que se pueden amarrar con varillas, cables o cadenas aseguradas a pernos o anclajes.



**Figura 24.** Anclajes en roca (García, 1996)

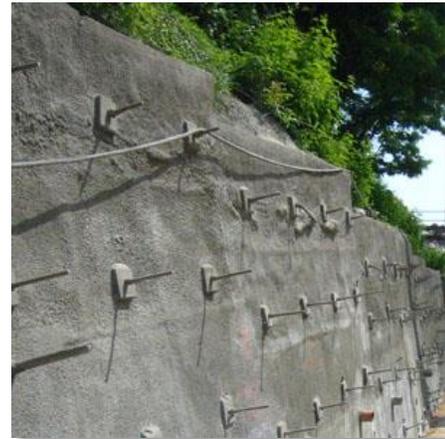
- **Pantallas ancladas:** Son muros de concreto vaciado directamente sobre la cara del talud, con formaleta frontal o contruidos con elementos prefabricados. Obtienen su capacidad de la contención de una serie de cables o barras pre o postensadas colocadas en perforaciones realizadas previamente y ancladas a terreno firme detrás de la superficie de falla por medio de inyecciones de mortero.



**Figura 25.** Pantalla anclada (Fuente: el autor)

- **Suelo empernado o sistema de clavetaje (“soil nailings”):** Consiste en reforzar el suelo en el sitio con la instrucción de barras o perfiles de acero hincados o barrenados e inyectados con lechada de cemento o mortero en toda su longitud. Uno de sus extremos se conecta a un recubrimiento estructural del talud

formado generalmente con malla de refuerzo y concreto lanzado.



**Figura 26.** Soil nailing (Fuente: el autor)

- **Pilotes y Caissons:** Deslizamientos poco profundos pueden estabilizarse en un sistema de contención con pilotes hincados en forma continua o poco espaciados. Los pilotes deben empotrarse en suelo firme y competente para evitar su arrancamiento o inclinación. Es común la utilización de estructura de concreto armado, uniendo las cabezas de los pilotes para mejorar su rigidez y comportamiento en general.



**Figura 27.** Pilotes y caissons (Fuente: el autor)

## Revestimientos de taludes

La protección con elementos estructurales como bloques de concreto o piedra pegada con mortero puede emplearse cuando el material que conforma el talud no es apropiado para el crecimiento de vegetación, cuando esta no puede garantizar la estabilidad a largo plazo o cuando el talud es susceptible a sufrir caídas de roca y deslizamientos de detritos. En este tipo de obras debe evitarse la generación de presiones hidrostáticas detrás del revestimiento, esto se logra mediante el uso de geotextiles o capas de material granular entre el terreno natural y el revestimiento. Adicionalmente, estas obras deben complementarse con desagües en la base del talud.

Dentro de los tipos de revestimiento en taludes están:

- **Con vegetación:** Se emplea vegetación que puede fijarse con geomallas mientras germina e enraíza. También pueden colocarse paños de pasto asegurados al talud con estacas de madera.
- **Flexibles:** Se utilizan para evitar la caída de roca, están formados por mallas metálicas ancladas al talud con pernos para roca o con varillas insertadas en las discontinuidades. En algunos casos se emplean para controlar la caída de bloques, extendiendo la malla a lo largo del talud y dejando los amarres muy espaciados, con el propósito que la malla atrape los bloques desprendidos y reduzca su energía.
- **Rígidos livianos:** Consisten en la colocación de mallas metálicas y aplicación de concreto lanzado. El talud debe ser alisado, uniformizado o escalonado para mejorar el anclaje de la malla.
- **Rígidos pesados:** Entramados de concreto prefabricados o fundidos in situ, los bloques de concreto y las pantallas de concreto.

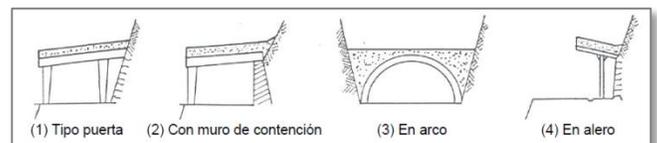
(Grupo Técnico INVIAS, 2006)

Este tipo de obras buscan reducir la amenaza generada por la ocurrencia de eventos de caída de rocas controlando la distancia y la dirección de la trayectoria de caída. Además de las obras ya descritas en el numeral anterior.

Entre las funciones de estos está la de detener el movimiento y absorber la energía producida por el impacto de rocas y desviar su trayectoria para que no ocurran daños en zonas específicas.

A continuación se enumeran otros tipos de estructuras de retención:

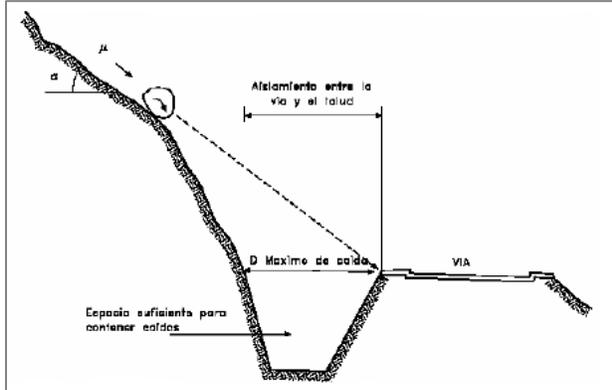
- **Escudos contra caídas de rocas:** Son estructuras fuertes de concreto reforzado, pre-esforzado o metálicas que cubren un tramo de carretera para protección contra caída de roca, absorbiendo el impacto de los bloques desprendidos y cambiando la trayectoria de su movimiento. Encima de los escudos se acostumbra colocar una capa de 90cm de espesor para amortiguar los impactos.



**Figura 28.** Escudos contra caída de rocas (Suárez, 1998)

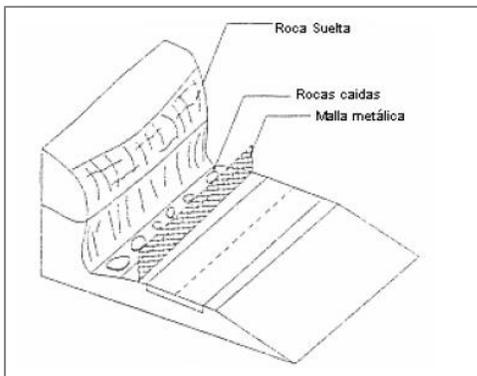
- **Cunetas, bermas y trincheras de intercepción:** Se construyen para recoger los bloques caídos y evitar que lleguen a la carretera.

## Estructuras de retención de rocas



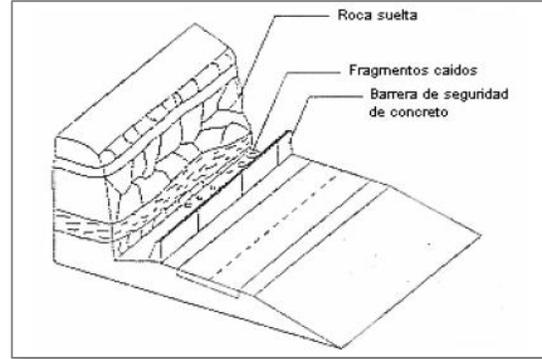
**Figura 29.** Trincheras contra derrumbes (Suárez, 1998)

- **Cercados y redes de contención en malla de alambre:** Se colocan entre el espaldón de la carretera y el tope del talud. En general, se diseñan para detener bloques de hasta 60cm de diámetro.



**Figura 30.** Protección con defensa de malla metálica (Suárez, 1998)

- **Muros de contención:** Se utilizan para evitar el ingreso de los bloques desprendidos a la carretera y para su almacenamiento. Se construyen en concreto reforzado, gaviones, rieles y travesaños metálicos, postes y cables, vigas de perfil en I, y en maderos y postes.



**Figura 31.** Muros de contención como barrera de protección (Suárez, 1998)

## Inventario de Deslizamientos

El inventario de deslizamientos puede realizarse utilizando una variedad de técnicas y herramientas entre las que se encuentran:

- Mapeo geomorfológico en el campo. Reconocimiento de las formas del terreno, indicadores de deslizamientos, relacionándolos con los deslizamientos históricos conocidos.
- Interpretación de fotografías aéreas verticales u oblicuas. Después de un cuidadoso análisis de las fotografías aéreas y correlaciones de campo, se digitalizan sobre los mapas topográficos las áreas de deslizamientos activos e inactivos que se detectaron en el área estudiada.
- Monitoreo de la superficie del terreno a profundidad.
- Interpretación de sensores remotos. Imágenes de satélite o de avión de alta resolución; ópticas o de radar.
- Modelos digitales de elevación tomados del satélite o de avión.
- Análisis histórico de periódicos o crónicas.
- Investigación de archivos en entidades, empresas de ingeniería o geotecnia. Recolección de la información de las entidades responsables de la información sobre deslizamientos (En cada país o región, las entidades son diferentes).

- Revisión de mapas anteriores de inventarios de deslizamientos. En algunos países, se tienen mapas muy completos de inventario de los deslizamientos existentes, generalmente, con sistemas de información geográfica.
- Realización de encuestas a los vecinos, sobre localización, fecha y magnitud de los deslizamientos ocurridos en los últimos años.

(Suárez, 2009)

# Herramientas para Modelación

## Herramientas para el desarrollo del modelo

Para el desarrollo del modelo de priorización de Obras geotécnicas es importante tener conocimientos de herramientas que se implementan tales como lo son:

- Métodos de evaluación multicriterio
- Distancia de Manhattan
- Consulta a expertos
- Análisis estadístico de datos
- Sistemas de Información Geográfica

## Evaluación Multicriterio

La evaluación multicriterio es un conjunto de técnicas utilizadas en la decisión multidimensional dentro del campo de la toma de decisiones (Barredo & Bosque, 1999)

Los análisis multicriterio ofrecen la oportunidad de obtener un análisis equilibrado de todos los factores que afectan en los problemas de PLANIFICACIÓN, particularmente debido a que varios efectos intangibles, como los sociales y las repercusiones ambientales pueden ser considerados cabalmente.

El objetivo general de la evaluación multicriterio poder emitir un juicio comparativo entre criterios o medidas heterogéneas; y los objetivos pueden ser económicos, ambientales, sociales, institucionales, técnicos y estéticos. (Pietersen, 2006)

Casi todas las técnicas de EMC consisten en una primera etapa, del diseño de una matriz con los criterios y las alternativas definidos; la siguiente etapa consiste en la agregación de las distintas puntuaciones de los criterios, con el uso de algún procedimiento de agregación (la aplicación de alguna técnica o modelo de evaluación) específico, tomando en cuenta la preferencia de los decisores expresada en término de pesos que se asignan a los diferentes criterios; ese procedimiento o técnica permite al decisor comparar entre las diferentes alternativas con base a los pesos asignados. (Chakhar, 2003)

La metodología multicriterio permite:

- **Identificar las partes de un sistema:** a través de un análisis jerárquico se puede descomponer un problema en sus partes constituyentes o por lo menos, aquellas que pueden ser observables.
- **Reconocer el peso de las partes:** no todos los efectos tienen la misma importancia relativa al momento de observar un resultado. La metodología multicriterio es capaz de reconocer la importancia de cada variable observable.
- **Identificar los vínculos entre las partes:** el orden jerárquico del problema permite reconocer las dimensiones del problema y las variables que le subyacen a ellas.
- **Proponer una solución racional:** la metodología multicriterio, permite incorporar aspectos tales como la experiencia y las valoraciones que se puedan tener sobre el problema; y lo hace de una manera metodológica de tal modo que los criterios sean integrados y entreguen una solución racional.

Actualmente existe una gran cantidad de metodologías de evaluación multicriterio de Dentro de los métodos de evaluación Multicriterio se pueden mencionar:

- Ponderación lineal
- Método de la Entropía

- Método de Diakoulaki (CRITIC)
- Método de la Ordenación Simple
- Método de Proceso de Jerarquía Analítica
- Método de Utilidad Multiatributo
- Método de Relaciones de superación

## Método Ponderación lineal

La ponderación lineal es un método que permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información, este supone la transitividad de preferencias o que sean comparables. Es un método completamente compensatorio, y puede resultar dependiente, y manipulable, de la asignación de pesos a los criterios o de la escala de medida de las evaluaciones. Es un método intuitivo y sencillo de utilizar y, por ello, ampliamente difundido. (Martínez & Escudey, 1997)

## Método de la Entropía

Este método fue propuesto por Zeleny (1982) como un método objetivo de cálculo de los pesos ya que parte del supuesto de que un criterio tiene mayor peso cuando mayor diversidad hay en las evaluaciones de cada alternativa y además su cálculo se realiza a partir de los valores que adquieren los distintos criterios que se van a ponderar. Conceptualmente se basa en la teoría de la información de Shannon que introduce el concepto de entropía en un canal de información.

Para su cálculo se empieza por normalizar por la suma los distintos valores de los criterios.

Luego se calcula la entropía de cada variable utilizando la siguiente fórmula

$$E_j = -K \sum_i a_{ij} \log a_{ij}$$

Donde:

$$K = \frac{1}{\log m}$$

Y  $m$  es el número de alternativas

Además, se debe calcular la diversidad o entropía como:

$$D_j = 1 - E_j$$

Finalmente se obtiene la ponderación o peso de cada uno de los criterios como:

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_j D_j}$$

Tal como lo expresa (Estrada, 2002) el método de Entropía tiene varias ventajas, entre las cuales:

- Jerarquiza cualquier cantidad de alternativas ( $m$ ), con cualquier cantidad de criterios ( $n$ )
- Los criterios, no requieren de la asignación de Pesos por parte del decisor.
- La entropía, a partir de la información de los valores de estado, determina el Peso propio de cada criterio, con base en la información propia con que es cargada la matriz. No permitiendo así, el error de generalizar valores o reglas subjetivas de asignación de valores o pesos particulares para los criterios.
- Invita a reflexionar, sobre el resultado de los pesos entrópicos, para determinar la relevancia real de los criterios incluidos en la Matriz de Decisiones. Aún más, cuando se comparan los Pesos Entrópicos obtenidos, mediante diferentes transformaciones de criterios.
- Permite Ponderar la "Pericia del Decisor", cuando esta es real, entro los pesos del decisor y los Pesos entrópicos.
- Permite realizar un Análisis de Sensibilidad.

(Estrada, 2002)

## Método CRITIC

Este método fue presentado por Danae Dakoulaki en el año 1992.

El método consiste en asignar pesos según la varianza de los criterios y la relación que haya entre cada uno de ellos. Por consiguiente, el peso de un criterio es tanto mayor cuanto mayor sea su varianza (mayor desviación típica) y cuanto mayor información diferente a la de los otros criterios aporte (menor coeficiente de correlación entre columnas). (Aznar & Guijarro, 2012)

Con el fin de que las magnitudes sean comparables se procede previamente a la normalización ellas transformándolas a valores entre 0 y 1. Luego se calculan la desviación estándar y los coeficientes de correlación

La desviación estándar se calcula aplicando la fórmula conocida.

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n}}$$

Así mismo la fórmula del Coeficiente de Pearson está dada por:

$$r_{jk} = \frac{\text{cov}(j, k)}{s_j * s_k}$$

Y finalmente los pesos están dados por:

$$w_j = s_j * \sum (1 - r_{jk})$$

Donde:

$w_j$  = Peso o ponderación de la variable j

$s_j$  = Desviación típica de la columna j

$r_{jk}$  = Coeficiente de correlación entre la Columna j y la k

(Aznar & Guijarro, 2012)

## Método de Ordenación Simple

El método de la Ordenación simple es un método muy simple ya que en él lo único que se demanda al decisor es que ordene los criterios de mayor a menor importancia, de forma que después se da el mayor valor al primero y el menor valor al último. En el supuesto de que dos criterios se definan como de la misma importancia a cada uno de ellos se le adjudica el promedio de ambas valoraciones. Puntuados los criterios se normalizan por la suma y el resultado es la ponderación final de los criterios. Este método por su sencillez puede ser aplicado en situaciones de poca información sobre las variables por parte del decisor. (Aznar & Guijarro, 2012)

## Método de Análisis Jerárquico

El AHP fue propuesto por el Profesor Thomas L. Saaty (1980), tomar una decisión de cierta complejidad.

El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un modelo jerárquico que básicamente contiene tres niveles: meta u objetivo, criterios y alternativas. (Toscano, 2005)

Una vez construido el modelo jerárquico, se realizan comparaciones en pares entre dichos elementos (criterios y alternativas) y se atribuyen valores numéricos a las preferencias señaladas por las personas, entregando una síntesis de las mismas mediante la agregación de esos juicios parciales. El fundamento del proceso de Saaty descansa en el hecho que permite dar valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende. Para estas comparaciones se utilizan escalas de razón en términos de preferencia, importancia o probabilidad, sobre la base de una escala numérica propuesta por el mismo Saaty, que va desde 1 hasta 9. Una vez obtenido el resultado final, el AHP permite llevar a cabo un análisis de sensibilidad. (Martínez & Escudey, 1997)

## Distancia de Manhattan

En la evaluación multicriterio es conveniente la utilización de distintos métodos para poder tener valoraciones según distintas metodologías. Sin embargo, al final del proceso posiblemente habrá tantas valoraciones de los criterios como métodos se hayan utilizado.

Para resolver este problema es que se considera la distancia de Manhattan. La base de esta elección está en el trabajo de Yoon (1987) en el que intenta medir la credibilidad de las diferentes métricas llegando a la conclusión de que la métrica L1 (distancia de Manhattan) es la más creíble.

La distancia de Manhattan se basa en el axioma de Zeleny, que indica "Dadas dos soluciones posibles en el espacio de los objetivos  $f_1$  y  $f_2$  la solución preferida será aquella que se encuentre más próxima al punto ideal" (Aznar & Guijarro, 2012)

En los estudios de credibilidad existen varias distancias, entre ellas la distancia de Manhattan, la distancia Euclidiana y la distancia Chebyshev para la cual la distancia de Manhattan viene a considerar la distancia para con la valoración es la más adecuada.

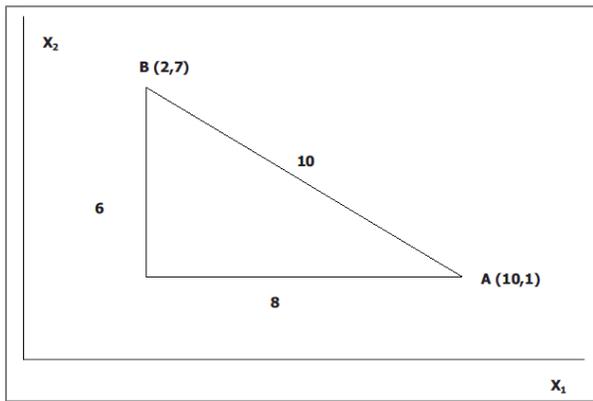
El concepto general de distancia se representa por la siguiente expresión:

$$L_p = \left[ \sum_{j=1}^n |x_j^1 - x_j^2|^p \right]^{\frac{1}{p}}$$

Donde: P=1 para la distancia de Manhattan.

En un eje bidimensional (Figura 32), las distancias entre dos puntos A y B serían:

- Distancia Manhattan ó L1 =6+8=14
- Distancia Euclidiana ó L2 = 10
- Distancia Chevyshev o L $\infty$ =8



**Figura 32.** Distancia Euclidiana y Manhattan (Romero, 1997)

Aquella metodología cuya distancia de Manhattan sea la menor será el método cuya solución se debe optar como definitiva, (Aznar & Guijarro, 2012)

## Consulta a expertos

Para el adecuado desarrollo del modelo de priorización es necesario hacer una consulta a expertos, ya que ellos decidirán la importancia de los criterios del modelo definido, para ello se opta por entrevistar a una determinada cantidad de personas sobre el tema a tratar.

Dentro de los beneficios de consultar a expertos en el tema se encuentran:

- Referencian el proyecto para que el mismo tenga validez.
- Los expertos ayudan a aclarar dudas que puedan surgir sobre el tema.
- Se permite el dialogo y la retroalimentación de la investigación.
- Se recopila la información necesaria para poder desarrollar el tema.

Una vez efectuada la consulta a expertos se procede a procesar la información de manera que se ratifique que la población entrevistada es suficientemente representativa y que los datos recopilados tienen la validez necesaria que se necesita para estos estudios.

## Análisis Estadístico de datos

Los datos extraídos de la consulta de expertos deben ser analizados estadísticamente para poder saber si los datos tienen distribución normal de probabilidad.

### Distribución Normal de Probabilidad

Como parte del análisis estadístico de los datos es importante que los mismos tengan distribución normal ya que ratifican que los datos con congruentes y confiables.

A la distribución de probabilidad se le conoce con el nombre de campana de Gauss, pues al representar su función de probabilidad, ésta tiene forma de campana.

Dentro de las principales características de este tipo de distribución se pueden mencionar que:

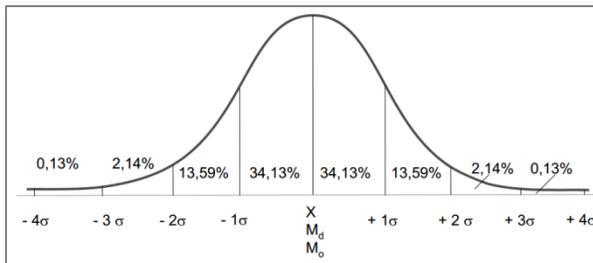
- La curva normal tiene forma de campana y un solo pico en el centro de la distribución

- La media aritmética, la mediana y la moda de la distribución son iguales y se localizan en el pico.
- La distribución de probabilidad es simétrica alrededor de su media.

Para que los datos tengan distribución normal de probabilidad se debe cumplir que:

- Aproximadamente el 68% de todos los valores de la población normalmente distribuida debe tener como máximo  $\pm 1$  desviación estándar de la media.
- Aproximadamente el 95% de todos los valores de la población debe tener cuanto mucho  $\pm 2$  en su valor de desviación
- Aproximadamente el 99,7% de todos los valores de una población normalmente distribuida se debe encontrar en un rango de  $\pm 3$  de su valor de desviación estándar de la media.

(Araya, 2012)



**Figura 33.** Propiedades de la distribución Normal (Levin & Rubin, 2004)

## Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica o georeferenciada pueden definirse como información de naturaleza diversa sobre un determinado territorio, almacenada en un conjunto de bases de datos, tanto, gráfica como alfanumérica, cuya relación con el territorio se realiza a través de un sistema de referencia geográfico y se gestiona a través de uno o varios programas informáticos específicos

El conjunto es soportado por un sistema de computadores y por un personal especializado; El objetivo de los SIG es la obtención, gestión y análisis de los datos a través de una serie de procedimientos que concluyen con la obtención de resultados a un problema planteado sobre un determinado territorio. (Sanz, 2007)

Los SIG permiten:

- Entrada de datos
  - Digitalizar o escanear
  - Convertir datos digitales de otros formatos.
  - Adquirir otros datos disponibles.
- Manipulación y análisis:
  - Respuesta a preguntas particulares.
  - Soluciones a problemas particulares.
- Salida de datos:
  - Despliegue en pantalla de datos.
  - Copias en papel
  - Reportes
  - Listados

## Modelos de representación de la información espacial

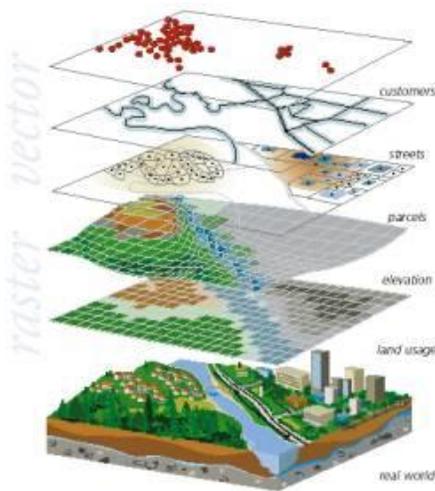
Es importante saber cómo trabajan los sistemas de información geográfica. Es por ello que se deben conocer los tipos de representación de la información espacial.

En general existen varios tipos de modelos de datos. En mapas planos formados por puntos, líneas y polígonos se utilizan fundamentalmente dos aproximaciones:

- **Modelo Vectorial:** Representa objetos codificando sus fronteras mediante puntos, líneas y polígonos.
- **Modelo matricial (Raster):** Donde la unidad básica es la celda, que no es más que una unidad de imagen cuyo tamaño regular dependerá de la resolución con que se defina la cobertura. Éste está formado por una matriz de píxeles donde cada pixel tiene un valor que es el que le proporcional el color con el que se representa gráficamente. Este formato de facilidad para realizar el álgebra de mapas.

Los dos tipos de modelos de representación no son excluyentes, ya que sus ventajas e inconvenientes se complementan y

siendo necesario frecuentemente trabajar con ambos modelos de datos. (Ayuga, 2008)



**Figura 34.** Modelos de representación SIG. (Recuperado de [http:// www.juliomange.com](http://www.juliomange.com))

## Funciones Analíticas

Dentro de los sistemas de información geográfica existen muchas funciones que ayudan a manipular la información de manera que sirvan en la toma de decisiones, diseño, procesos de planeación, etc. Dentro de estas herramientas están las llamadas funciones analíticas.

Elas constituyen el elemento más característico de un SIG y los diferencia de los sistemas CAD. Ellas tratan conjuntamente datos cartográficos y atributos temáticos.

Tradicionalmente se distinguen cuatro tipos de funciones:

- **Recuperación:** Este grupo contiene operaciones como la consulta de base de datos, la búsqueda selectiva de entidades, reclasificación, etc.
- **Superposición:** Se caracterizan por modificar la información cartográfica como atributos de la misma. La superposición de coberturas de información genera nuevos contornos y la información contenida puede responder a cualquier función algebraica aplicada a la información de las coberturas originales.

La superposición crea nuevas capas de información con la combinación de los atributos de las capas de entrada.

- **De Vecindad:** Permiten determinar características como la pendiente o las direcciones de flujo.
- **De conectividad:** Tienen en común el uso de operaciones que van acumulando valores a lo largo de las entidades que lo atraviesan, siendo el resultado final del tipo cualitativo o cuantitativo. (Ayuga, 2008)

## Sistemas de Coordenadas

Para poder manipular los sistemas de Información geográfica es importante tener conocimientos básicos de geografía.

Los sistemas de coordenadas geográficas son un sistema de referencia usado para localizar y medir elementos geográficos. Para representar el mundo real, se utiliza un sistema de coordenadas en el cual la localización de un elemento esta dato por las magnitudes de latitud y longitud en unidades de grados, minutos y segundos. (Mass & Valdez, 2003).

## Proyecciones Cartográficas

Ahora bien, para poder visualizar información es necesario conocer un poco sobre proyecciones cartográficas.

Elas son procedimientos que nos permiten representar el esferoide terrestre en el plano del mapa. De igual manera presentan los problemas de distorsión de los contornos de la figura proyectada.

Dentro de las proyecciones que existen están:

- Cónicas.
- Cilíndricas
- Ortográficas.
- Gnómicas
- Estereográficas
- Planas.

(Arias, 2010)

## Proyecciones planas

La superficie de referencia más comúnmente usada para la descripción de localizaciones geográficas es una superficie esférica. Esto es

válido aún sabiendo que la figura de la tierra se puede modelar más como un elipsoide que como una esfera. Se sabe sin embargo que para la generación de una base de datos que permita la representación de elementos correctamente georeferenciados, y en unidades de medida común como metros o kilómetros, debe ser construida una representación plana.

Toda proyección lleva consigo la distorsión de una o varias de las propiedades espaciales ya mencionadas. El método usado para la proyección será el que en definitiva nos permita decidir cuales propiedades espaciales sean conservadas y cuales distorsionadas. Proyecciones específicas eliminan o minimizan la distorsión de propiedades espaciales particulares. Las superficies de proyección más comunes son los planos, los cilindros y los conos, según el caso se exige la proyección azimutal, cilíndrica y cónica respectivamente. (Peña, 2006)

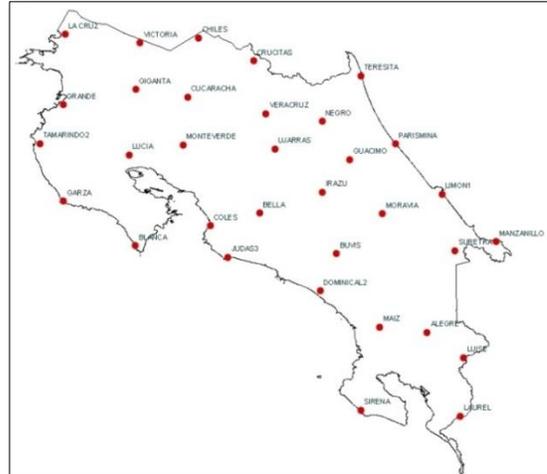
## Sistema de referencia CR05 y la proyección CRTM05

Para el caso de Costa Rica, existen 3 tipos de proyecciones planas cartográficas a mencionar:

- Lambert Norte
- Lambert Sur
- CRTM05

Donde, según el Instituto Geográfico Nacional, en el 2007 se el sistema de coordenadas horizontales para Costa Rica, denominado CR05, el cual tiene carácter oficial y viene a sustituir al sistema de coordenadas Lambert, datum Ocatepeque.

El datum geodésico está definido por 34 estaciones GPS denominadas de primer orden las cuales se encuentran distribuidas en todo el territorio nacional.



**Figura 35.** Red de primer orden de estaciones GPS para Costa Rica (Instituto Geográfico Nacional)

Esta proyección consiste en la utilización de un cilindro orientado de este a oeste. Dicha proyección es recomendada para países en que el eje mayor este de este a oeste, ya que la proyección provoca una única distorsión. El elipsoide de referencia utilizado es WGS84. (Araya, 2012)



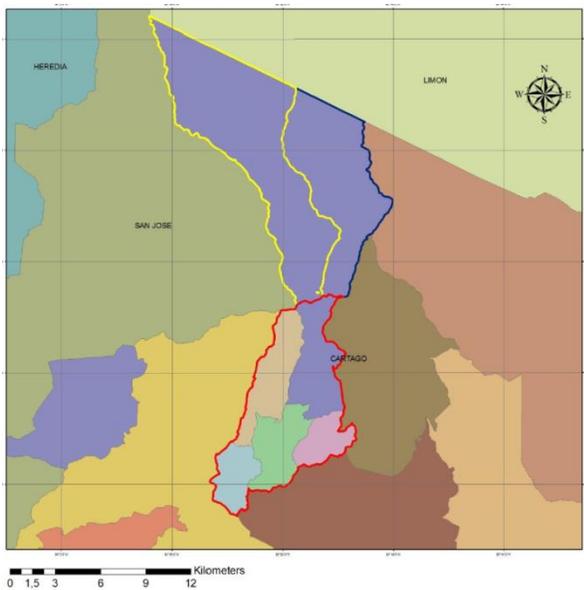
# Antecedentes

## Zona de estudio

Oreamuno es el cantón número 7 de la provincia de Cartago, donde su ciudad cabecera es San Rafael, que se encuentra a un kilómetro de distancia del área metropolitana de la ciudad de Cartago, hacia el noreste.

El cantón está situado a las faldas del Volcán Irazú. Es una zona básicamente rural donde menos del 10% es zona urbana. (Fallas A. , 2010) Su actividad económica es básicamente agrícola, con la siembra y comercialización de hortalizas tales como papas, cebollas, zanahorias, yucas y lechugas, entre otras.

Tiene forma alargada e irregular, y cuenta con un área de 202,31 km<sup>2</sup> y tiene una población aproximada de 4650 personas (INEC, 2010).



**Figura 36.** Ubicación geográfica del cantón de Oreamuno de Cartago. (Fallas A. , 2010)

## Situación Actual de la Conservación

En (Dahlhaus Parkman, 2002) el Banco Mundial señala como causas de una inadecuada conservación las siguientes:

- Limitaciones en la capacidad técnica del personal.
- Financiamiento inadecuado.
- Escasez de fondos y deficiente sistema de distribución de fondos.
- Demasiada inversión en nuevos proyectos.
- Carencia en la definición clara de las responsabilidades.
- Estructuras organizacionales de administración ineficientes.
- Sistemas de administración de la conservación débiles.
- Métodos ineficientes en la ejecución de los trabajos.

(Dahlhaus Parkman, 2002)

Recomendando la aplicación de prácticas tales como:

- Separación de la planeación y la administración en la implementación de los trabajos.
- Identificación adecuada de formas para la contratación de los trabajos.
- Requerimientos de personal.
- Una estructura de administración adecuada.
- Sistemas de administración de la información.
- Sistemas de contabilidad y finanzas apropiados.
- Aseguramiento de la calidad de los trabajos.

- Autonomía administrativa y la responsabilidad de rendir cuentas de lo realizado.

Para cada una de estas prácticas analiza y propone las acciones conducentes señalando que las entidades encargadas de la conservación deben contar con sistemas efectivos de gestión de la administración de sus redes de carreteras, en los que se involucre al cliente como elemento calificador del servicio prestado por los caminos y con ello se identifiquen sus necesidades en el establecimiento de planes y programas, en la implementación de acciones y en el monitoreo de que también se comportan los proyectos.

## Determinación de Criterios de Evaluación

La ocurrencia de los deslizamientos es el producto de las condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas y la modificación de éstas por procesos geodinámicos, vegetación, uso de la tierra y actividades humanas, así como la frecuencia e intensidad de las precipitaciones y la sismicidad.

La presencia de deslizamientos es un fenómeno sujeto a muchos grados de incertidumbre, debido a que los éstos incluyen diferentes tipos de movimientos, velocidades, modos de falla, materiales, restricciones geológicas, etc., y el valor del factor de seguridad, puede no ser confiable, debido a que no tiene en cuenta la incertidumbre de la ignorancia con respecto a la confiabilidad de los datos para el análisis, las incertidumbres de los modelos matemáticos y las incertidumbres humanas (Morgenstem, 1997). Cuando existe incertidumbre sobre la posibilidad o no, de la ocurrencia de un fenómeno, generalmente se toman decisiones equivocadas de diseño. El costo de un proyecto puede resultar muy alto o se tienen que asumir riesgos de características y magnitudes no determinadas.

La adecuada priorización de obras geotécnicas debe englobar aspectos ambientales, socio-económicos, técnicos. De allí la importancia de una correcta definición de los criterios a

evaluar, ya que esta permite la adecuada toma de decisiones.

El “modelo de priorización de obras geotécnicas” pretende tomar los factores socio-económicos que permitan saber la importancia social y el impacto económico de las obras geotécnicas, los factores ambientales que determinen cuáles son las zonas más susceptibles a deslizamientos y los factores técnicos in-situ que permitan determinar el estado de los taludes, laderas y obras geotécnicas, con lo cual se pueda determinar un modelo para la gestión adecuada de las obras de ingeniería geotécnica.

Para el caso de los factores ambientales se analizaron metodologías para susceptibilidad a deslizamientos (tales como la metodología Mora-Vahrson) y se hizo una exhaustiva investigación bibliográfica de los procesos de falla así como las condiciones originales del terreno, los factores deteriorantes y finalmente los factores detonantes que inciden en ocurrencia de fallas.

La siguiente figura esquematiza la definición de los criterios para el proyecto de manera que:

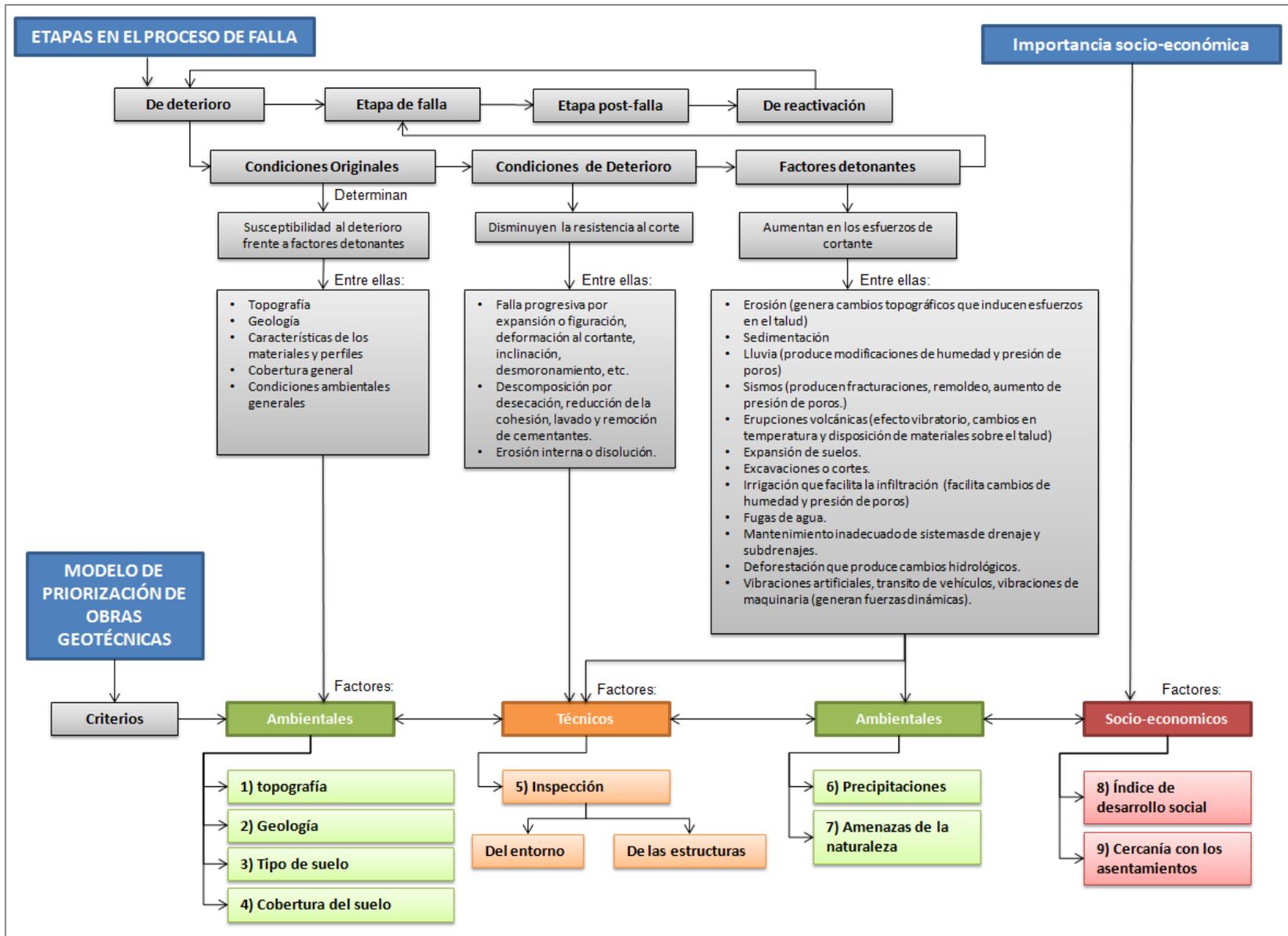


Figura 37. Determinación de Criterios de Evaluación Geotécnica (Fuente: el autor)

## Desarrollo del Territorio

Es de suma importancia tomar en cuenta aspectos socioeconómicos ya que:

- Por un lado, el hombre induce cambios en el medio ambiente de un talud pues las actividades humanas tienen gran influencia sobre la activación de los deslizamientos. Actividades tales como el uso de la tierra, las prácticas de agricultura, la construcción de carreteras y la irrigación entre otras, son factores determinantes en la ocurrencia de deslizamientos.
- Por otro lado, la adecuada priorización de obras geotécnicas debe tomar en cuenta la importancia de la vía para la economía del país, su accesibilidad para las importaciones, exportaciones así como toda actividad económica interna.

El desarrollo social, según MIDEPLAN se puede definir como *“el proceso mediante el cual se procura alcanzar una sociedad más igualitaria, participativa e inclusiva, que garantice una reducción de la brecha que existe en los niveles de bienestar que presentan los diversos grupos sociales y áreas geográficas, para lograr una integración de toda la población a la vida económica, social, política y cultural del país, en un marco de respeto y promoción de los derechos humanos”* (MIDEPLAN, 2007)

En Costa Rica, el Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica se ha dado a la tarea de crear el Índice de desarrollo Social el cual permite hacer una medición a partir de un conjunto de indicadores del nivel de desarrollo social de los distintos sectores y que el mismo permita revisar, planificar y evaluar aspectos socio-económicos de proyectos vinculantes para el país.

Este índice comprende cuatro dimensiones:

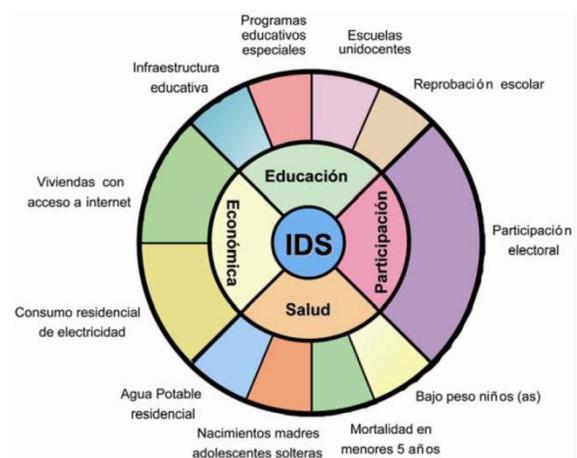
- **Económica:** Participar en la actividad económica y gozar de condiciones adecuadas de inserción laboral que permitan un ingreso suficiente para lograr un nivel de vida digno.
- **Participación Social:** Reflejado en el desarrollo de procesos civiles nacionales y locales, para que se desarrolle en la población el sentido de pertenencia y de

cohesión social y con ello el sentimiento de participación activa, responsable que implica el deber y el derecho de los ciudadanos a participar en el mismo.

- **Salud:** Orientado a gozar de una vida sana y saludable, lo que implica contar y tener acceso a redes formales de servicios de salud y seguridad social así como una nutrición apropiada, que garanticen la adecuada calidad de la vida de la población.
- **Educación:** Relacionado con la disponibilidad y el adecuado acceso de la población a los servicios de educación y capacitación que favorezcan un adecuado desarrollo del capital humano.

Y también está comprendido por once indicadores relativos a:

- Consumo promedio residencial de electricidad,
- Viviendas con acceso a internet
- Mortalidad de niños menores de 5 años
- Bajo peso en niños y niñas
- Nacimiento de hijos de madres solteras menores de 19 años
- Cobertura de agua potable
- Infraestructura educativa
- Programas educativos especiales
- Escuelas unidocentes
- Reprobación escolar
- Participación electoral



**Figura 38.** Esquema del Índice de Desarrollo Social (MINAE, 2006)

El índice de desarrollo social permite cubrir el criterio del desarrollo del territorio ya que el mismo muestra un ordenamiento de mayor a menor desarrollo económico-social y por tanto da las pautas necesarias para saber donde hay zonas prioritarias de intervención geotécnica.

Las fuentes de información para cada una de las dimensiones de este índice son:

- **Dimensión económica:**
  - Compañía Nacional de Fuerza y Luz
  - Instituto Costarricense de Electricidad
  - Cooperativa de Electrificación Rural de los Santos R.L.
  - Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos R.L.
  - Cooperativa de Electrificación Rural de Guanacaste R.L.
  - Cooperativa de Electrificación Rural Alvaro Ruiz R.L.
  - Empresa de Servicios Públicos de Heredia
  - Junta Administradora del Servicio Eléctrico de Cartago
- **Participación Social:**
  - Tribunal Supremo de Elecciones
- **Salud:**
  - Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC)
  - Ministerio de Educación Pública
  - Censo Vivienda 2000
  - Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
- **Educativa:**
  - Ministerio de Educación Pública

## Cercanía con los Asentamientos Humanos

El desarrollo socioeconómico aumenta la amenaza a los deslizamientos activados por lluvias y por sismos. Hay estudios que demuestran que hay una estrecha relación entre la ocurrencia de deslizamientos y la rapidez de los procesos de urbanización, en especial de los desarrollos desordenados, donde los casos más graves ocurren en áreas geotécnicamente susceptibles y con desarrollo urbano rápido y desordenado. (Suárez, 2009)

El ser humano está en constante modificación del medio y el efecto que esto ha tenido en los taludes es el de un agente desestabilizador.

En general los procesos de urbanización aumentan la susceptibilidad de las laderas urbanas a fallar por la gran cantidad de cortes y terraplenes que se construyen. Estos procesos modifican los estados de esfuerzos y disminuyen los factores de seguridad al deslizamiento.

Los procesos antrópicos pueden activar los deslizamientos por medio de:

- Cambios en el relieve.
- Sobrecargas en los taludes por medio de rellenos.
- Modificación de las condiciones naturales del agua superficial (concentración de las infiltraciones)
- Cambios en el régimen de agua superficial.
- Vibraciones de maquinarias y equipos
- Uso de explosivos
- Cambios de la estructura y condiciones de la capa superficial del suelo por prácticas de agricultura, pastoreo, tala de bosques, etc.
- Modificación del uso del suelo. (Suárez, 1998)

Algunos de los efectos que contribuyen a la inestabilidad son:

- Cortes con pendientes fuertes disminuyendo los factores de seguridad de los taludes.
- Colocación de rellenos aumentando los niveles de esfuerzos a cortante en el suelo.
- Redirección de las aguas de escorrentía.
- Aumentos de la infiltración por actividades tales como riego, pozos sépticos, etc.

La importancia de evaluar la cercanía con los asentamientos humanos cae precisamente en tomar en cuenta todos los efectos anteriormente mencionados.

Para la evaluación de este criterio se utilizará la información que brinda el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) el cual establece la cantidad de viviendas individuales y viviendas colectivas por distrito y con la cual se puede determinar la densidad por kilómetro

cuadrado siendo las zonas más pobladas las que tengan mayor peso en el modelo de priorización.

Un detalle importante de la utilización de esta fuente de información es que considera el nivel de tránsito existente ya que las vías ubicadas en zonas cercanas a centros de población serán las más transitadas. (Araya, 2012).

## Topografía

Al aumentar la pendiente, generalmente se aumentan las fuerzas que tratan de desestabilizar el talud y disminuyen los factores de seguridad al deslizamiento. Los taludes con alta pendiente son muy susceptibles a la ocurrencia de inclinaciones, caídos y flujos de residuos. Además de la pendiente, es muy importante la curvatura de la superficie. (Suárez, 2009)

El relieve afecta la formación de los suelos; porque modifica las relaciones de humedad dentro de ellos, también controla el grado de escorrentía, la remoción del suelo, el grado de erosión y la incidencia de los rayos solares sobre la superficie según la posición del relieve con respecto al Sol.

Existe una relación entre la pendiente y las propiedades de los suelos. Las propiedades más comunes que se asocian a la pendiente son:

- Profundidad del suelo y contenido de materia orgánica.
- Humedad
- Color del perfil.
- Desarrollo del suelo
- Contenido de sales solubles.
- Carácter del material parental inicial
- Temperatura.



**Figura 39.** Esquema de topografía (Ulloa & Vargas, 2007)

La información de la topografía y pendiente del terreno se basará en las curvas topográficas

dadas por los diversos planos catastrados en escalas 1:10000 y 1:50000 que existen para el país elaborados por el Instituto Geográfico Nacional (ente encargado de la confección de mapas y cartas de la República, en sus diferentes modalidades), con las cuales con ayuda de alguna herramienta de georeferenciación se puede crear un modelo de elevación digital del terreno para determinar las distintas pendientes que presentan.

## Estructuras Geológicas

Cada formación geológica posee un determinado patrón de comportamiento, potencial de meteorización, erosividad, etc. los cuales determinan condiciones de susceptibilidad a deslizamientos. (Suárez, 2009)

A esto se deben sumar las estructuras geológicas en las cuales es muy común que ocurran deslizamientos ya que son superficies de debilidad existentes en el suelo o la roca.

Las estructuras geológicas están conformadas por las discontinuidades, fracturas, planos de estratificación o superficies de debilidad del macizo o talud. Dentro de los elementos de estructura geológica que más afectan los deslizamientos están:

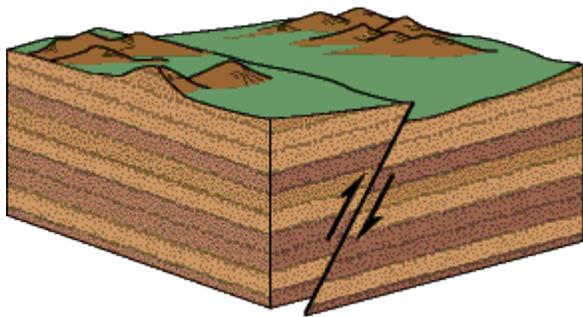
- **Los planos de estratificación:** Los cuales corresponden a los planos de cambio de litología del material, propios de las rocas sedimentarias.
- **Los planos de foliación o esquistosidad:** Que son planos de microestructura comunes en rocas metamórficas.
- **Las fracturas:** Que son planos de rotura presentes en la mayoría de formaciones rocosas y están relacionadas con los procesos tectónicos y factores de evolución de la corteza terrestre.
- **Las paleo-superficies de movimiento:** Que son superficies lisas de muy baja resistencia, a lo largo de las cuales han ocurrido anteriormente desplazamientos. (Suárez, 2009)

La información para valoración de este criterio de evaluación será tomada de los mapas de amenaza existentes para el país elaborados por la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, Proyecto MIRVYS, UCR/ UNA/

RECOPE/ ICE y del Atlas desarrollado por la escuela de Ingeniería Forestal del ITCR

Los mapas de amenazas han sido elaborados a partir de recopilación bibliográfica, cartográfica, documental, técnica y científica disponible de los principales fenómenos geológicos que se han presentado en el pasado o que tienen alto grado de probabilidad de ocurrencia. (CNE). En ellos se muestran:

- Zonas de vulnerabilidad a deslizamientos (flujos)
- Zonas meteorizables
- Fallas geológicas
- Zonas susceptibles a inestabilidad



**Figura 40.** Estructuras geológicas (recuperado de [http:// www.windows2universe.org](http://www.windows2universe.org))

## Tipo de Suelo

Muchas veces el tipo de suelos presentes en la zona determinan también la susceptibilidad a deslizamientos. Existen formaciones geotécnicas que son susceptibles a presentar problemas geotécnicos, en especial:

- **Arcillas de alta expansividad:** las cuales son suelos residuales, típicamente producto de la erosión y transporte desde sectores escarpados aledaños, o la descomposición meteórica y actividad de suelos piroclásticos. Ellas pueden generar presiones de hinchamiento de hasta 700kPa; lo cual las hace potencialmente capaces de levantar losas, pisos, pavimentos, dañar estructuras geotécnicas, muros, tuberías, cajas, registros, etc. (CCCR, 2009)
- **Limos de baja resistencia:** Su origen está asociado con la alteración de materiales piroclásticos bajo condiciones

de alta pluviosidad. Los mismos son muy susceptibles por su baja resistencia y capacidad de compactación. (CCCR, 2009)

- **Suelos granulares finos de baja densidad:** este tipo de suelo está asociado principalmente a depósitos, aluviales y eólicos, cuyos procesos de transporte los han dispuesto en alternativas de capas de arenas finas, mal graduadas, de baja densidad, que combinan con niveles freáticos cercanos a la superficie y bajo condiciones de sismos fuertes, puede perder su resistencia, y causar daños a las obras existentes (fenómeno de licuación o licuefacción). (CCCR, 2009)

Según la (UNESCO, 1976) la zonificación geotécnica se puede definir como “proceso que subdivide el área abarcada por cualquier hoja cartográfica en un cierto número de zonas que son aproximadamente homogéneas en términos de sus propiedades geotécnicas.”

El propósito y la utilidad del mapa de zonificación debe atenderse según (Bolaños, 1994), como “una ayuda para poder conocer a priori las principales características de un terreno, como serían: tipos de suelos a encontrar, principales problemas asociados al comportamiento de las estructuras en esos suelos, zonas de deslizamiento potencial y de inundación, etc. No se pretende que una zonificación se convierta en sustituto de un estudio geotécnico debidamente realizado, más bien sería un orientador del trabajo por realizar”

Los mapas de zonificación geotécnica de Costa Rica fueron el resultado de un trabajo de un grupo de profesionales que se basaron en información de campo, mapas taxonómicos, etc., y en ellos se establecen ubicaciones generales de las zonas donde pueden encontrarse suelos con características geotécnicas similares. Ellos fueron planteados tomando en cuenta:

- La plasticidad del suelo
- La consistencia del suelo (duro-suave)
- Los problemas geotécnicos especiales (arcillas expansivas, limos colapsables).
- La ubicación del nivel freático

(Bogantes, 1999)

La zonificación planteada por (Bogantes, Laporte, Quesada, & Vásquez) se puede describir como sigue:

- **Suelos arcillosos de alto potencial de expansión (símbolo “Arc”):** Color negro de muy alto potencial de expansión, de al menos 60cm de espesor. Generalmente son suelos de topografías muy planas, lo que dificulta su drenaje y a la vez favorece su desarrollo.
- **Suelos aluviales (símbolo “Lic”):** Los cuales tienen su origen en la depositación de los materiales finos (limos y arcillas) arrastrado por los ríos. Es importante anotar que frecuentemente presentan un nivel freático superficial y que son susceptibles a licuarse en caso de sismo. En general son suelos blandos y por sus constituyentes (limos y arenas) son suelos permeables.
- **Suelos arenosos (símbolo “LicA”):** Son suelos de zonas costeras sumamente arenosos, originados por la depositación de materiales producto del oleaje y corrientes marinas. Son suelos poco consolidados y de nivel freático usualmente superficial lo cual los hace susceptibles a licuarse en caso de sismos fuertes.
- **Suelos de poco espesor (símbolo “Roc”):** Son suelos poco desarrollados por la existencia de un material resistente a poca profundidad. Su permeabilidad es alta, ya que estos aluviones no están cementados y usualmente contiene cantidades apreciables de materiales limosos y arenosos, que le confieren una buena permeabilidad.
- **Suelos volcánicos (símbolos “V1, V2, V3”):** Son suelos derivados de cenizas volcánicas y de la meteorización de rocas volcánicas, y el contenido de estas cenizas y su grado de alteración es lo que determina en gran medida sus características. Dentro de las características de estos tipos de suelos están:
  - Estructura porosa y altas relaciones de vacío
  - Alta humedad natural
  - Suelos muy permeables
  - Suelos blandos para fines de cimentación
  - Bajos pesos unitarios
 Los suelos V1 (compuestos por ceniza fresca) son suelos con gran contenido de

vidrio volcánico meteorizado, arenosos. Los mismos solo se ubican alrededor del volcán Arenal.

Los suelos V2 (con gran contenido de minerales amorfos) son suelos que se ubican en los alrededores de algunos edificios volcánicos de Costa Rica y estudios realizados muestran que estos suelos son profundos, blandos y con estructura colapsable ante una eventual saturación del terreno.

Los suelos V3 (suelos residuales de origen volcánicos) tienen un contenido de arena de alrededor de 20% y generalmente son del tipo MH o ML según clasificación SUCS. Son suelos blandos, de buena permeabilidad. En algunos sitios estos suelos pueden presentar comportamiento colapsable, aunque en menor grado que los suelos del tipo V2.

- **Suelos residuales (símbolo “Lat”):** son suelos rojizos, mal llamados “lateríticos” en el ámbito ingenieril. Generalmente arcillas limosas de alta plasticidad (MH según clasificación SUCS). Su principal problema radica en su susceptibilidad a fenómenos de inestabilidad de taludes como reptación y deslizamientos superficiales.
- **Suelos aluviales saturados (símbolo “Sat”):** son suelos permanentemente saturados, de origen aluvial. Son muy blandos y el horizonte arcilloso a poca profundidad los hace muy impermeables. Los mismos presentan problemas de estabilidad en excavaciones a cielo abierto.
- **Suelos residuales de color amarillento (símbolo “Am”):** se caracterizan por estar permanentemente húmedos durante todo el año, pueden ser pedregosos y en general con buena permeabilidad.
- **Suelos en zonas húmedas (símbolos “V1w, V2w, V3w, Latw, Amw”):** en general son suelos más blandos, difíciles de trabajar y de bajas densidades con las características mencionadas anteriormente.

## Cobertura del suelo

La vegetación cumple efectos protectores importantes, en la mayoría de los taludes protege contra la erosión y afecta los procesos de evapotranspiración y de infiltración de agua.

Algunas estadísticas muestran que los deslizamientos ocurren 3.5 veces más en zonas desprovistas de vegetación que en zonas vegetadas. La tala y la quema indiscriminada de los bosques tropicales, especialmente cerca de los núcleos urbanos han producido efectos catastróficos de erosión y ocurrencia de deslizamientos. (Suárez, 2009)

Las condiciones hidrológicas de un talud son afectadas directamente por la vegetación. La vegetación también cumple un efecto de estabilización por el refuerzo del suelo (la acción de las raíces) y por la producción de materia orgánica, la cual puede ayudar a cementar las partículas del suelo. En general, todo el proceso ecológico (flora, fauna, micro-fauna, uso del suelo, etc.) debe considerarse como un modelo conceptual por su influencia sobre el comportamiento del talud. (Suárez, 2009).

La valoración de este criterio se efectúa por medio de los mapas de uso de suelo elaborados mediante convenio Unión Europea / PRUGAM y supervisados por el Instituto Geográfico Nacional. En ellos se delimitan las zonas urbanas (de uso residencial y recreativo), zonas rurales (uso agrícola, explotación agropecuaria, etc.).

Los usos de suelos consideran factores de tales como:

- **Zonas urbanizadas:** densidad, industria, áreas verdes de las zonas urbanas, tajos importantes, etc.
- **Zonas de cultivos:** anuales, permanentes, fincas de café, uso mixto, pastos y árboles dispersos, invernaderos, plantaciones de coníferas.
- **Zonas de ganadería:** pastos, pastos con árboles dispersos, pastos mezclados con árboles dispersos, pastos mezclados con árboles.
- **Cobertura boscosa:** primarios, secundarios, secundarios fragmentados, charrales.

(Arias, 2010)

## Precipitación

La mayoría de las fallas de los taludes están relacionadas de una u otra forma, con el agua. El agua juega un papel muy importante en la mayoría de los procesos que reducen la resistencia del suelo. Igualmente, está relacionada con varios tipos de carga que aumentan los esfuerzos del cortante en los taludes. (Orozco, 2007)

Uno de los elementos que causa mayores problemas a los caminos es el agua, pues en general disminuye la resistencia de los suelos, presentándose así fallas por terraplenes, cortes y de la superficie de rodamiento. Lo anterior obliga a construir el drenaje de forma tal que el agua se aleje a la mayor brevedad posible de la obra. (Olivera F. , 1996)

La lluvia, produce modificaciones en la humedad y en la presión de poros lo cual afecta la resistencia del suelo. Comúnmente, la intensidad y la persistencia alta de precipitación es la causa principal de gran cantidad de deslizamientos. (Suárez, 2009)

La interpretación más frecuente del efecto del agua es que las lluvias por infiltración, saturan el talud y la presión de poros, induce a una disminución de la resistencia al cortante, la cual a su vez, puede activar un deslizamiento

Entre los efectos del agua en el suelo se pueden mencionar:

- Lubricación de los materiales del suelo
- Ablandamiento de los materiales del suelo.
- Aumento de presión de poros.
- Sub-presiones de agua subterránea.
- Fatiga por fluctuaciones del nivel freático.
- Lavado de cementantes.
- Aumento de Densidad (peso).
- Grietas por desecación
- Erosión
- Disminución del ángulo de fricción interno crítico.

La precipitación es uno de los elementos que presenta mayor variación en el tiempo y el espacio. En general, la precipitación se define como la cantidad de agua que cae sobre la superficie terrestre. Este se mide como la cantidad de litros de agua que caen sobre un metro cuadrado de superficie. A cada litro de esos se llama milímetro de lluvia. (Orozco, 2007)

En general la precipitación se da de tres formas diferentes:

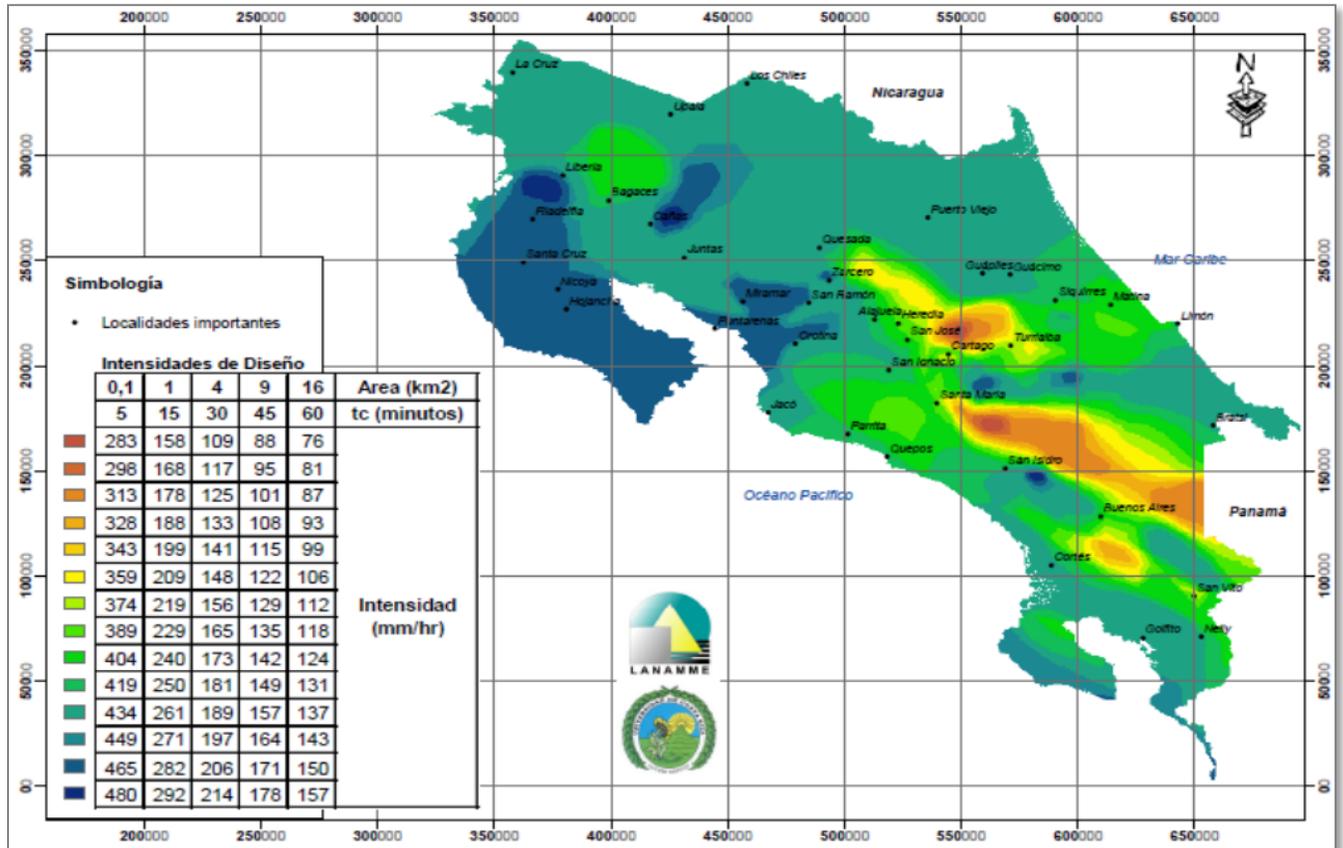
- **Convección térmica:** Se da cuando una masa de aire es calentada por la superficie y asciende, de manera que el aire caliente es reemplazado por el aire más frío de los alrededores. Luego la masa de aire es rodeada por corrientes de aire frío que la envuelven y así se forma una columna. Posteriormente el aire que ha ascendido y tiene mayor humedad se enfría adiabáticamente, hasta alcanzar la misma temperatura del aire circundante y se detiene. En este proceso el vapor de agua podría eventualmente alcanzar una temperatura inferior al punto de rocío, con lo cual se da la precipitación. Este tipo de lluvia es lo que se conoce como "aguacero", con gotas gruesas y con gran velocidad de caída. (Orozco, 2007)
- **Precipitación Orográfica:** esta forma de lluvia está asociada a la presencia de barreras topográficas naturales en la dirección de los vientos como son las cordilleras. En general, las masas de aire en movimiento cuando existen montañas se ven forzadas a subir para poder sobrepasarlas, así conforme asciende, la temperatura disminuye lo que permite la formación de precipitaciones. (Orozco, 2007)
- **Convección frontal:** cuando dos masas de aire de condiciones físicas distintas, una cálida y otra fría, se encuentran no se pueden mezclar fácilmente y se forma entre ellas una superficie de transición que se conoce con el nombre de frente. Así en el caso de los frentes fríos se dan lluvias muy intensas. (Orozco, 2007)

La evaluación de la precipitación se basa en los mapas de zonificación climatológica que establece (Orozco, 2007) y en la metodología Mora-Vahrson para la determinación de la susceptibilidad a deslizamiento, donde establece los factores de activación de deslizamientos por disparo de lluvias horarias con un período de retorno de 100 años.

Para poder relacionar la intensidad horaria a la intensidad diaria se usa el método de

Elías&Ruiz el cual establece de manera sencilla la intensidad de lluvias para distintas duraciones y distintos periodos de retorno. (Elías & Ruiz, 1979)

- Como metodo alternativo se puede usar el método Mora-Vahrson para el cual se debe tener acceso a la información de las intensidades diarias para las distintas estaciones meteorológicas de la zona con periodos de estudio de no menos de 10 años.



**Figura 41.** Mapa de intensidad de lluvias para un periodo de retorno de 25 años y distintos tiempos de concentración (Orozco, 2007)

## Sismicidad

Los sismos son fenómenos naturales causados por movimientos de las fallas geológicas en la corteza terrestre. Al moverse las fallas, se producen ondas de diferentes tipos que liberan grandes cantidades de energía, las cuales viajan a través de la corteza terrestre y pueden activar deslizamientos.

En el caso de un sismo, estos aumentan los esfuerzos de cortante y disminuyen los esfuerzos de resistencia por aumento de la presión de poros y deformación, asociados con la onda sísmica. Esto genera que en muchos casos haya problemas geotécnicos asociados. (Suárez, 1998).

En Costa Rica hay aproximadamente 150 fallas sísmicas identificadas, las cuales están en capacidad de generar terremotos que podrían registrar magnitudes entre 5 y 6,5 grados en la

escala de Richter lo cual podrían generar deslizamientos.

Estas fracturas en la tierra (también llamadas fallas locales) se encuentran desde ras del suelo hasta una profundidad máxima de 15 kilómetros.

Para evaluar este criterio se hace referencia al método de evaluación de susceptibilidad a deslizamientos Mora-Vahrson-Mora (MVM) para la determinación de susceptibilidad a deslizamientos, que considera los eventos sísmicos presentados en la región durante los últimos 100 años, que han afectado el área de estudio y para los que se ha reportado su intensidad y según la estadística se le asigna un valor al criterio.

La información sobre los sismos presentados durante los últimos 100 años será obtenida de las bases de datos del OVSICORI.

## Inspección Visual

Los criterios de Índice de desarrollo social y cercanía con los asentamientos toman aspectos socioeconómicos. La topografía, la geología, el tipo de suelo y la cobertura del suelo comprenden aspectos ambientales pero a un nivel teórico y por tanto es de suma importancia saber el estado real de las zonas más susceptibles a deslizamientos y de esta manera, poder generar un modelo de priorización calibrado a condiciones reales de sitio.

La inspección debe contemplar no solamente aspectos del entorno, sino también las estructuras existentes ya que el estado de ellas puede determinar un orden de priorización superior en la zona a inspeccionar.

Dentro de las estructuras existentes, a inspeccionar se encuentran:

- Muros de gravedad
- Muros de Contención en gaviones
- Muros de contención en concreto reforzado
- Muros de tierra armada
- Pantallas
- Anclajes
- Drenajes

La evaluación del estado del entorno contempla taludes y laderas donde los daños a evaluar son:

- Derrumbes o fallas del talud
- Erosión superficial
- Caída de material suelto sobre la superficie del talud.
- Agrietamiento del terreno
- Daño por tipo de vegetación.
- Grietas en la corona del talud.
- Hundimiento de la corona del talud.
- Grietas en el pie del talud.
- Hundimiento del pie del talud.
- Abombamiento del pie de taludes conformados.
- Socavación del pie del talud.

Daños en las estructuras:

- Falla parcial o total por volteo, desplazamiento o rotura.
- Erosión de la superficie.
- Daño por impacto
- Agrietamiento
- Volteo
- Daño por vegetación
- Abombamiento
- Erosión de juntas.
- Desplazamiento de juntas

- Rotura del refuerzo

Daños en pantallas:

- Rotura de la cobertura rígida.
- Abombamiento de la cobertura rígida.
- Desprendimiento de la cobertura rígida.

Daños en los anclajes:

- Daño de la cabeza del anclaje
- Daño en tendones

Daños en drenajes y subdrenajes, son:

- Taponamiento de drenajes subsuperficial.
- Rotura de drenajes subsuperficial.
- Obstrucciones en canales y zanjas de drenaje
- Agrietamiento en canales y/o zanjas de drenaje.
- Rotura en canales y/o zanjas de drenaje

La evaluación se hace considerando la severidad y el tipo de daños presentes tanto en los taludes, laderas como en obras geotécnicas existentes, para así poder priorizar de forma adecuada la zona levantada. La valoración se hará considerando una escala de 5 puntos desde una condición muy buena con el valor de priorización menor y una condición muy mala con una priorización mayor.

Cabe señalar que diversos autores tales como (Bogantes, 1999), señalan que si los suelos están en permanente contacto con el agua, este factor se vuelve dominante sobre los otros. Es por ello que dentro de las obras geotécnicas se debe inspeccionar el estado de los drenajes.

El estado de drenaje de un suelo es afectado por dos factores diferentes:

- **Drenaje del sitio:** también llamado drenaje externo, se refiere a la frecuencia con que el sitio es afectado por una tabla de aguas superficiales, y también a las condiciones de drenaje topográficas del terreno. Las últimas son reducidas por una pendiente cóncava o plana.
- **Drenaje del perfil:** es la capacidad del suelo de remover el exceso de agua verticalmente, trasladándolo hacia abajo, y depende básicamente de las propiedades de textura del material que forma el depósito de suelo.  
(Bogantes, 1999)

El adecuado control del agua superficial tendrá un efecto positivo en todas las obras geotécnicas y por el contrario una adecuada

gestión de las mismas tendrá efectos negativos en la estabilidad de los taludes y obras geotécnicas construidas.

## Planteamiento

El planteamiento del proyecto pretende analizar distintos criterios que determinen el modelo de priorización geotécnica adecuado donde el modelo inicial se basa en aspectos socio-económicos y ambientales para luego añadir la inspección y observar el efecto de esta en el modelo.

Una vez efectuada la inspección y tomado en consideración la importancia de la estructura o talud y según el estado de los mismos, se asigna un peso a la inspección para finalmente generar un modelo calibrado y ajustado a las condiciones reales del sitio.

En la siguiente figura se muestra el esquema del planteamiento inicial:

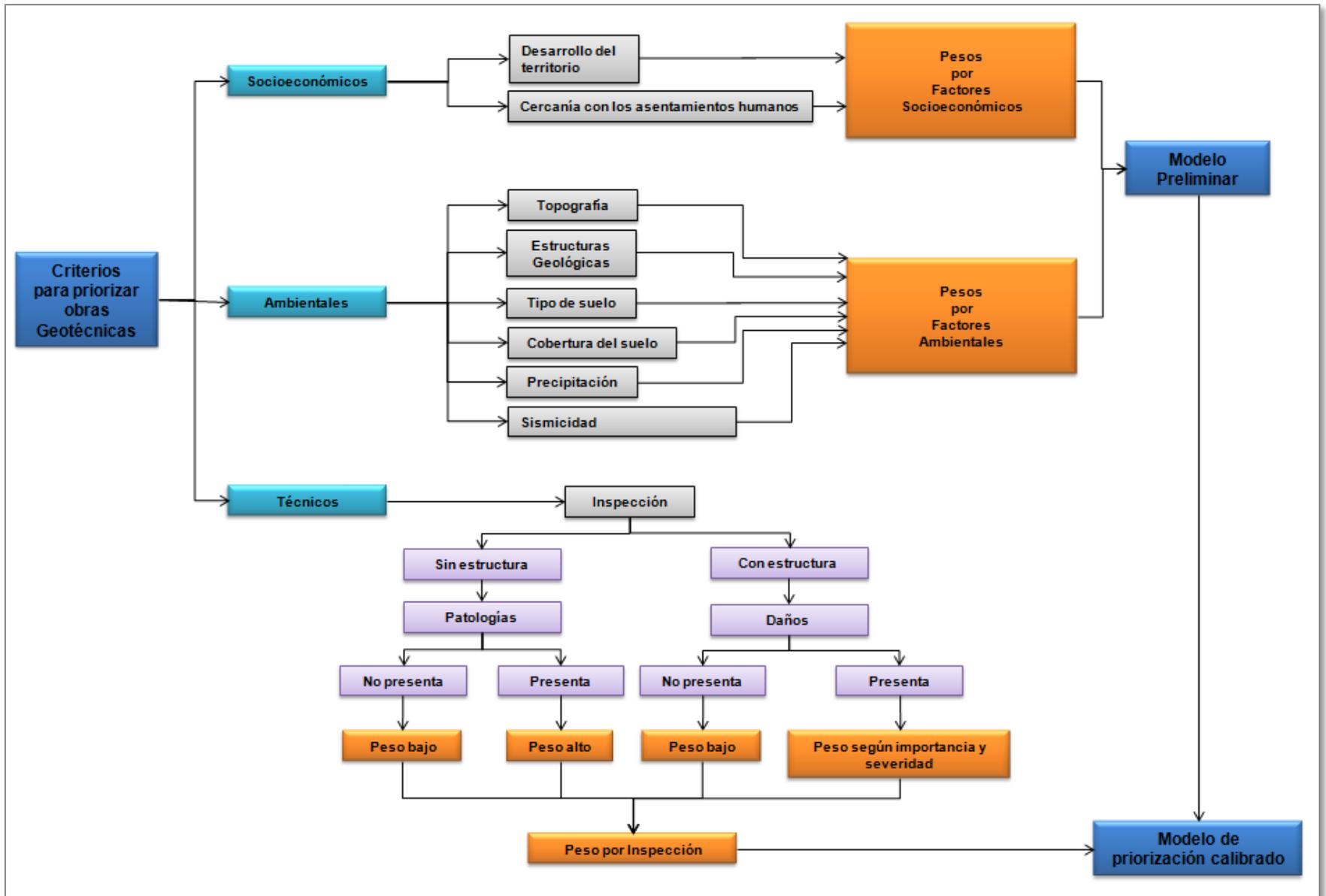


Figura 42. Esquema del planteamiento del Modelo de Priorización de Obras Geotécnicas (Fuente: el autor)



# Metodología

## Conceptualización

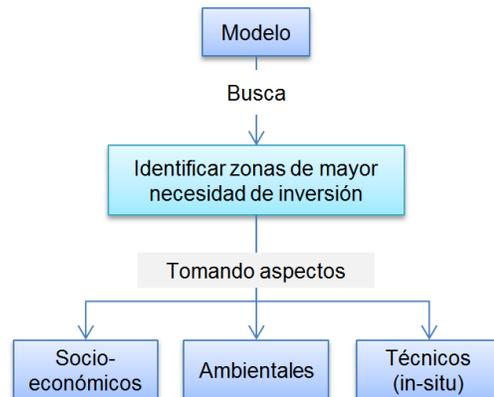
Un modelo se puede definir como “una simulación de un proceso del mundo real, lo cual faculta comprender mejor un fenómeno en cuestión, lo que permite predecir resultados en función de la información que se posee” (Arias, 2010).

Actualmente existen muchos vacíos en cuanto a la forma en que se destinan recursos para obras geotécnicas en la infraestructura vial del país. La finalidad de este trabajo es ser una herramienta útil en la toma de decisiones en cuanto a la priorización de estas obras geotécnicas.

El primer paso en un proceso de toma de decisiones es definir los criterios que nos ayudarán a decidir y una vez definidos estos es lógico pensar que todos no tienen la misma importancia, por lo que el siguiente paso será ponderar (determinar el peso o importancia) de los criterios.

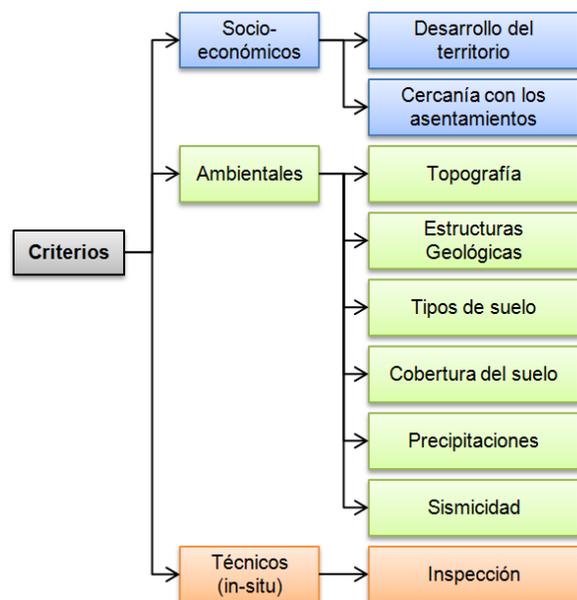
Después del estudio del estado del arte se determinó que se tomarían en cuenta aspectos socio-económicos, ambientales y técnicos (in-situ) definiendo tres ejes principales los cuales se subdividen en 9 criterios de evaluación, de manera que, se puedan tomar decisiones englobando, no solo aspectos políticos o de urgencia como generalmente sucede.

El objetivo del modelo es definir las zonas de mayor necesidad de inversión, mediante la recopilación y unión de información gráfica de cada uno de los criterios a los cuales se les debe asignar un peso por medio de la evaluación multicriterio. En la figura 43 se observa el esquema general del MPOG tal como:



**Figura 43.** Esquema general del MPOG (Fuente: el autor)

El modelo desarrollado presenta el siguiente esquema jerárquico de aspectos y criterios de estudio:



**Figura 44.** Esquema jerárquico de aspectos y criterios del MPOG (Fuente: el autor)

# Criterios

La determinación de los criterios a utilizar se basa en una amplia investigación bibliográfica, donde se buscaron los factores que inciden en la ocurrencia de problemas geotécnicos (condiciones originales, deteriorantes y detonantes) así como modelos homólogos utilizados a nivel internacional para la priorización de obras.

La determinación de los criterios definidos intenta dos cosas. Por un lado que engloben aspectos sociales, económicos, ambientales y técnicos. Por otro lado que para cada uno de ellos haya información confiable para todo el país y que la misma sea fácilmente accesible.

Finalmente los criterios definidos fueron:

- Aspectos Socioeconómicos:
  - Desarrollo del territorio
  - Cercanía con los asentamientos humanos
- Aspectos Ambientales:
  - Topografía
  - Estructuras Geológicas
  - Tipo de suelo
  - Cobertura del suelo
  - Precipitación
  - Sismicidad
- Aspectos Técnicos:
  - Inspección e inventariado

Donde las principales fuentes de información de los criterios fueron:

- LANAMME
- Escuela Centroamericana de Geología
- Instituto Geográfico Nacional
- Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica
- Instituto Nacional de Estadística y Censos, Unidades Estadísticas Mínimas (UGM)
- Código Sísmico de Costa Rica
- Código de Cimentaciones de Costa Rica.
- Inspección de Campo
- Informes de proyectos de graduación de la escuela de Ingeniería en Construcción del Instituto Tecnológico de Costa Rica y de la Universidad de Costa Rica.

# Consulta a profesionales

Una vez definidos los criterios se procedió a definir la población de profesionales a consultar de manera que se pudiera saber el peso de los criterios definidos.

Se intentó que la consulta a profesionales fuera lo más sencilla posible de manera que no hubieran confusiones de interpretación respecto a lo que se perseguía.

Para efectuar la consulta se hizo un pequeño cuadro donde se pidió evaluar la importancia del criterio donde:

Muy alta	5
Alta	4
Media	3
Moderada	2
Baja	1

(Fuente: el autor)

La consulta pretendía que cada profesional respondiera según la experiencia y el conocimiento con que se contaba. Se explicaron los argumentos que se perseguían con cada criterio y finalmente se generó un cuadro de manera que:

(Fuente: el autor)

La consulta se realizó a personas que se desenvuelven en el ámbito de la conservación vial y profesionales del ámbito de geotecnia y profesionales de las organizaciones involucradas, a saber:

- Ingenieros de la Gerencia de Conservación de Vías y Puentes del Consejo Nacional de Vialidad.

Cuadro 2. Valoración de la importancia del criterio.		
Aspectos	Criterios	Valoración
Socio-económicos	1) Desarrollo del territorio	
	2) Cercanía con los asentamientos humanos	
Ambientales	3) Topografía	
	4) Estructuras Geológicas	
	5) Tipo de suelo	
	6) Cobertura del suelo	
	7) Precipitación	
	8) Sismicidad	
Técnicos (In-situ)	9) Inspección visual e inventariado	

- Ingenieros de la Asociación Costarricense de Geotecnia
- Profesores del Instituto Tecnológico de Costa Rica
- Profesores de la UCR.
- Profesionales de ProDUS y CIVCO.
- Profesionales del ICE, de la CNFL de la CNE.
- Profesionales de Instituciones Privadas tales como INSUMA, Ingeotec-CR, Geomekca, etc.

## Evaluación Multicriterio

Mediante la revisión bibliográfica se determinaron las metodologías de evaluación multicriterio a utilizar.

Se buscó un mecanismo de evaluación que tomara en cuenta la varianza de las respuestas por parte de los profesionales, sabiendo que en estos temas las respuestas pueden ser muy diferentes de un profesional respecto a otro.

Finalmente se decidió utilizar 2 métodos de evaluación (método de la entropía y método CRITIC). Ambos contemplan la varianza de los datos dentro de sus ecuaciones.

Ahora bien, para saber cual método es el más adecuado para el modelo desarrollado se utiliza la distancia de Manhattan, con esta distancia es posible evaluar cual método es más conveniente para el trabajo en cuestión.

### Método de la Entropía

Se procede a:

1. Montaje de la Matriz de decisión con los criterios y alternativas.
2. Se normalizan los datos por la suma los distintos valores de los criterios, a saber:

$$x_{j \text{ NORMALIZADO}} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$$

3. Se calcula el valor de la constante  $K$  como:

$$K = \frac{1}{\log m}$$

Donde:

- $m$  es el número de alternativas
4. Luego se calcula la entropía de cada variable utilizando la siguiente fórmula

$$E_j = -K \sum_i a_{ij} \log a_{ij}$$

5. Se debe calcular la diversidad o entropía como:

$$D_j = 1 - E_j$$

6. Finalmente se obtiene la ponderación o peso de cada uno de los criterios como:

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_j D_j}$$

### Método CRITIC

Se procede a:

1. Montaje de la Matriz de decisión con los criterios y alternativas.
2. Se normalizan los datos por la suma los distintos valores de los criterios, a saber:

$$x_{j \text{ NORMALIZADO}} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$$

3. Se calcula la desviación estándar aplicando la formula conocida

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

4. Así mismo se calcula el Coeficiente de Pearson dado por:

$$r_{jk} = \frac{\text{cov}(j, k)}{s_j * s_k}$$

5. Y finalmente los pesos están dados por:

$$w_j = s_j * \sum (1 - r_{jk})$$

Donde:

- $w_j$  = peso o ponderación de la variable j
- $s_j$  = desviación típica de la columna j
- $r_{jk}$  = coeficiente de correlación entre la columna j y la k

## Distancia Manhattan

Una vez efectuadas la evaluación por los dos métodos (Entropía y CRITIC) se procede a calcular las respectivas distancias de Manhattan como:

$$L_1 = \left[ \sum_{j=1}^n |x_j^1 - x_j^2| \right]^{\frac{1}{1}}$$

Respecto al valor de su media ya que sería su valor óptimo respecto a la distribución normal de los datos.

El peso de los criterios vendrá dado por la metodología que presente la distancia Manhattan menor.

## Inspección

Para llevar a cabo esta etapa se procedió a desarrollar formularios de inspección donde se efectúa un inventario visual del estado de las estructuras y los taludes de las zonas más vulnerables según una modelo de zonificación de la susceptibilidad a problemas geotécnicos previamente elaborado.

Se decidió tratar la inspección con dos formularios, el primero para levantamiento de taludes conformados y laderas naturales donde no existan obras civiles construidas más que las obras de drenaje, las cuales, deberían estar presentes a todo lo largo de la carretera. El segundo formulario donde se realice la inspección las obras civiles existentes.

Los formularios están elaborados de tal manera que se pueda evaluar el estado de la estructura o talud según sea el caso y así determinar un peso en el modelo de priorización.

Los mismos se muestran a continuación como:

conavi		CONSEJO NACIONAL DE VALIDAD/ DIRECCIÓN DE CONSERVACIÓN VIAL				conavi	
FORMULARIO PARA INSPECCIÓN VISUAL (TALUDES)							
ZONA:					Día	Mes	Año
REGIÓN:					Hoja	De	
RUTA:					Estruc. / Ruta / Sentido / Lado / km		
SECCIÓN DE CONTROL:					CODIGO		
Empresa:				Responsable:			
<b>Datos generales</b>							
Ubicación		Dimensiones		Definición		Esquema	
km inicial:	Sentido:	Longitud (m):		<input type="checkbox"/> Ladera Natural <input type="checkbox"/> Talud artificial (corte) <input type="checkbox"/> Terraplén (relleno)			
km final:	Lado:	Pendiente promedio (°):					
Coordenadas (x):	Coordenadas (y):	Altura máxima (m):		Cobertura:			
<b>Estado del talud</b>							
Movimientos							
Tipo de movimientos				Magnitud		Tipo de material	
<input type="radio"/> Caída <input type="radio"/> Flujos <input type="checkbox"/> de detritos y tierra <input type="checkbox"/> de lodos <input type="checkbox"/> plástico (creep o reptación)		<input type="radio"/> Volcamiento <input type="radio"/> Deslizamiento <input type="checkbox"/> rotacional <input type="checkbox"/> traslacional <input type="radio"/> Movimiento complejo		<input type="checkbox"/> < 20m3 <input type="checkbox"/> entre (20-100)m3 <input type="checkbox"/> > 100m3 Especificar: _____		<input type="checkbox"/> Roca <input type="checkbox"/> Aluviones/ detritos <input type="checkbox"/> Tierra Especificar: _____	
<b>Señales de movimiento</b>							
Patología		Dimensiones	Fotos	Anotaciones/Observaciones			
<input type="radio"/> Erosión superficial <input type="checkbox"/> < 10% superficie <input type="checkbox"/> (10-30)% superficie <input type="checkbox"/> > 30% superficie							
<input type="radio"/> Agrietamiento o escalamiento de: <input type="checkbox"/> Cuerpo del talud <input type="checkbox"/> Corona del talud <input type="checkbox"/> Pie del talud <input type="checkbox"/> Carretera (grietas de tracción en terraplén)							
<input type="radio"/> Caída de material suelto <input type="radio"/> Hundimiento de corona de talud <input type="radio"/> Hundimiento de subrasante en terraplén <input type="radio"/> Levantamiento de pie de talud <input type="radio"/> Socavación de pie de talud <input type="radio"/> Deformación de estructuras adyacentes							
<b>Deficiencia de Drenajes y Subdrenajes</b>							
Patología		Medición	Severidad		Fotos	Anotaciones	
			Baja	Media	Alta		
<input type="radio"/> Taponamiento drenajes profundos <input type="radio"/> Obstrucciones en drenajes <input type="radio"/> Agrietamiento en drenajes <input type="radio"/> Rotura drenajes <input type="radio"/> Inexistencia de drenaje							
<b>Observaciones:</b>							

Figura 45. Formulario de Inspección Visual para Taludes y Laderas (Fuente: el autor)

		<b>CONSEJO NACIONAL DE VIALIDAD/ DIRECCIÓN DE CONSERVACIÓN VIAL</b> <b>FORMULARIO PARA INSPECCIÓN VISUAL (ESTRUCTURAS)</b>													
<b>ZONA:</b>				Día		Mes		Año		Hoja		De		Estruc. / Ruta / Sentido / Lado / km	
<b>REGIÓN:</b>				[ ]		[ ]		[ ]		[ ]		[ ]		CODIGO	
<b>RUTA:</b>				Empresa:											
<b>SECCIÓN DE CONTROL:</b>				Responsable:											
Estructuras															
de Contención								Otras							
<input type="checkbox"/> Dique de Contención en tierra				<input type="checkbox"/> Muro de concreto reforzado				Pantallas y anclajes							
<input type="checkbox"/> Muro de gaviones				<input type="checkbox"/> Muro anclado				Obras de drenaje y subdrenaje							
<input type="checkbox"/> Muro de Gravedad en concreto (ciclopeo)				<input type="checkbox"/> Muro de encofrado o cribas											
<input type="checkbox"/> Muro de tierra reforzada															
Datos generales de la Estructura															
Ubicación		Dimensiones		Anotaciones				Esquema							
km inicial:		Sentido:													
km final:		Lado:													
Coordenadas (x):		Coordenadas (y):													
Patologías de Obras de contención															
<input type="radio"/> Falla parcial o total por:				<input type="radio"/> Daño por impacto (fracturamiento):				<input type="radio"/> Erosión de juntas:							
<input type="checkbox"/> volteo				<input type="checkbox"/> rosión, no grietas				longitud afectada: _____							
<input type="checkbox"/> deslizamiento				<input type="checkbox"/> rosión y grietas				<input type="radio"/> Vegetación:							
<input type="checkbox"/> capacidad portante				<input type="checkbox"/> altura				% área afectada: _____							
<input type="checkbox"/> deflexión excesiva				% área afectada: _____				<input type="radio"/> Corrosión:							
<input type="checkbox"/> abombamiento				<input type="radio"/> Agrietamiento:				% área afectada: _____							
<input type="checkbox"/> asentamiento				<input type="checkbox"/> 3mm				<input type="radio"/> Rotura o exposición del refuerzo (concreto ref., malla (gaviones), ó geotextil (tierra armada):							
<input type="checkbox"/> otro: _____				<input type="checkbox"/> 3-5)mm				% área afectada: _____							
<input type="radio"/> Erosión de la superficie de la estructura:				<input type="checkbox"/> 5mm				<input type="radio"/> Otra: _____							
<input type="checkbox"/> < 2cm				% área afectada: _____											
<input type="checkbox"/> > 2cm, <10% superficie				<input type="radio"/> Desplazamiento de juntas:											
<input type="checkbox"/> > 2cm, >10% superficie				<input type="checkbox"/> érdida de sello < 20% , sin infiltración											
% área afectada: _____				<input type="checkbox"/> érdida de sello entre (20-40)% , sin infiltración											
<input type="radio"/> Socavación:				<input type="checkbox"/> érdida de sello > 20% , hay infiltración				<b>Fotos:</b>							
Dimensiones: _____				long. afectada: _____											
Patologías en Pantallas y anclajes															
<input type="radio"/> Daño ó pérdida de cabezales				<input type="radio"/> Desprendimiento de cobertura rígida				<b>Fotos:</b>							
<input type="radio"/> Corrosión:				<input type="radio"/> Fisuramiento de pantalla											
% área afectada: _____				<input type="radio"/> Otras: _____											
Patologías de Drenajes y Subdrenajes															
Patología	Medición	Severidad			Fotos	Anotaciones									
		Baja	Media	Alta											
<input type="radio"/> Taponamiento drenajes profundos															
<input type="radio"/> Obstrucciones en drenajes															
<input type="radio"/> Agrietamiento en drenajes															
<input type="radio"/> Rotura drenajes															
<input type="radio"/> Inexistencia de drenaje															
Observaciones:															

Figura 46. Formulario de Inspección Visual para Estructuras (Fuente: el autor)

# Implementación

Para la implementación del modelo es necesario tener conocimientos de los sistemas de información geográfica, ya sea *ArcGIS* o cualquier otro software, tal como se mencionó en el apartado de herramientas para el modelo.

Cada criterio se valorará y se representará dentro de una capa (shapefile), esto permite tener un mapa por cada criterio de manera que se vea cómo afecta el mismo dentro de la zona a estudiar. Una vez valorados y representados cada uno de los criterios se procede a unirlos de manera que se pueda obtener una valoración geotécnica final de manera que

$$P_1 \times EC_1 + P_2 \times EC_2 + \dots = \text{Valoración final}$$

Donde:

- *P* es el peso del criterio
- *EC* es la evaluación del criterio

Para efectuar este cálculo se procede a unir los mapas con el respectivos peso del criterio utilizando la herramienta *Algebra de mapas* que presenta *ArcGIS*.

Finalmente el orden de priorización vendrá dado por la valoración final que se obtenga de manera que se pueda establecer el orden e importancia adecuado de priorización. El siguiente agrupa los resultados finales de manera que las zonas se clasifique como:

Cuadro 3. Importancia de priorización de la zona	
Muy alta	4-5
Alta	3-4
Media	2-3
Moderada	1-2
Baja	0-1

(Fuente: el autor)

## Evaluación de Criterios

Para el caso de estudio el modelo fue aplicado al cantón de Oreamuno de Cartago (a petición del

CONAVI) sin embargo la evaluación se puede realizar por igual para cualquier parte del país.

Los criterios se valoran según las condiciones propias de cada zona de manera que:

## Valoración del Desarrollo del Territorio

El índice de desarrollo social se obtuvo del Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN), siendo los distritos con mayor índice son los que poseen mayor importancia económica, generalmente es donde hay más construcciones y movimientos de terrenos por lo que tienen una mayor valoración.

En cuanto a este criterio se debe resaltar la importancia de estar generando nuevos índices de desarrollo social ya que la información no se ha vuelto a actualizar desde el 2007 (año del que se toman los datos).

La valoración del criterio se establece como:

Cuadro 4. Valoración del desarrollo del territorio según su I.D.S.		
Categorías	I.D.S.	Valoración
Muy bajo	0-20	1
Bajo	20-40	2
Medio	40-60	3
Alto	60-80	4
Muy Alto	>80	5

(Fuente: modificado de Araya,2012)

La justificación de la clasificación de valoración se basa en el análisis según quintiles tomados por el MIDEPLAN.

## Valoración de la Cercanía con los Asentamientos Humanos

La información sobre la cercanía a asentamientos humanos se obtiene de las unidades geoestadísticas mínimas (UGM), utilizadas por el Instituto Nacional de Estadística y Censos en las

cuales se establece la cantidad de viviendas por distrito.

Conociendo el área de cada distrito y la cantidad de viviendas por distrito. Por medio del área del distrito y de la cantidad de viviendas, se puede conocer la densidad de habitaciones por distrito. La valoración de este criterio se realizó de manera que a mayor densidad de viviendas mayor es la modificación del suelo y por tanto mayor vulnerabilidad geotécnica.

La valoración de este criterio se basa en (Araya, 2012) que establece una puntuación por cercanía con asentamientos tal como sigue:

<b>Cuadro 5. Valoración de la cercanía con los asentamientos según densidad de viviendas por distrito</b>		
<b>Categorías</b>	<b>Densidad de viviendas (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Valoración (Cercanía asentamientos)</b>
Muy Baja	0,00000-0,00010	1
Baja	0,00011-0,00100	2
Media	0,01100-0,00300	3
Alta	0,00310-0,00500	4
Muy Alta	>0,00500	5

(Araya, 2012)

## Valoración de la Topografía

De las hojas cartográficas Carrillo e Istarú en escala 1:50 000 (I.G.N.) se obtiene la topografía de la zona.

Para poder valorar la topografía se deben conocer las pendientes del terreno y para esto se debe construir un modelo de elevación digital. Los modelos de elevación digital se pueden obtener por medio algunas herramientas que tienen los Sistemas de Información Geográficas con lo cual se pueden calcular las pendientes del terreno.

Una vez halladas las pendientes se procede a su valoración por medio del siguiente cuadro el cual se basa en la valoración que establece el método Mora-Vahrson:

<b>Cuadro 6. Clases de pendiente y valoración del criterio de pendiente</b>		
<b>Clase de pendiente</b>	<b>Características</b>	<b>Valoración</b>
Baja	<8°	2
Moderada	8°-16°	3
Fuerte	16°-35°	4
Muy Fuerte	>35°	5

(Mora, Chaves, & Vázquez, 2002)

## Valoración de las Estructuras Geológicas

La información para la valoración las fallas geológicas del área de estudio se obtiene de los mapas de amenazas de la naturaleza que brinda la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias, al Proyecto MIRVYS, UCR/ UNA/ RECOPE/ ICE. Ellos tienen como base geográfica las hojas cartográficas de Istarú y Carrillo a escala 1:50 000 y se pueden encontrar en la capa de fallas presentada por el Atlas de la escuela de ingeniería Forestal del ITCR.

Por experiencia y recomendación de los encargados del mantenimiento y conservación del CONAVI se decidió tomar la falla con un ancho de 200m, de manera que se tomen 100m a cada lado de la falla como zonas de alta vulnerabilidad a problemas geotécnicos asociados.

## Valoración del Tipo de suelo

El tipo de suelos se obtiene de los mapas de zonificación geotécnica para Costa Rica presentado por Roy Bogantes, Gastón Laporte, Carlos Quesada y Alexis Vásquez donde los suelos con mayores problemas geotécnicos son los que tienen una valoración mayor.

La valoración del criterio se asigna según el cuadro 6 como:

<b>Cuadro 7. Valoración del tipo de suelo</b>		
<b>Categorías</b>	<b>Tipos de suelo</b>	<b>Valoración</b>
1	Arc	5
2	Latw	5
3	Sat	5
4	Lat	4
5	Lic	4
6	LicA	4
7	V2w	4
8	V2	4
9	V3w	3
10	V3	3
11	V1w	3
12	Amw	3
13	V1	3
14	Am	3
15	Roc	2
16	Iago	2
17	Pant	2

(Bogantes, Laporte, Quesada, & Vásquez)

## Valoración de la Cobertura del suelo

Tal como se expuso en el capítulo anterior la cobertura del suelo determina su comportamiento a evapotranspiración y permeabilidad del suelo.

La valoración del criterio de cobertura del suelo se hizo de tal manera que las zonas verdes y de mayor capacidad de infiltración de agua son las que presentan una valoración menor.

La información para este criterio se tomó del plan PRUGRAM, utilizando las hojas: Chicué, Cot, Cipreses, Charcalitos, Diego de la Haya, Ochomogo, Pacayas, Paraíso, Retes, Tejar y Tierra Blanca, todas a escala 1:10 000.

La valoración de este criterio se toma de (Araya, 2012), donde:

<b>Cuadro 8. Valoración de la cobertura del suelo</b>		
<b>Categorías</b>	<b>Atributo</b>	<b>Valoración</b>
1	Plantación forestal	1
2	Bosque de Frondosas	1
3	Humedal	1
4	Curso fluvial	1
5	Aguas superficiales	1
6	Piscina	1
7	Charral	2
8	Pastos	3
9	Pastos con árboles dispersos	3
10	Terreno no cultivable	4
11	Área de Deporte y recreación	4
12	Otros cultivos	4
13	Caña de azúcar, café	4
14	Área de Explotación agropecuaria	4
15	Parques y zonas verdes	4
16	Frutales, hortalizas, granos, plantas ornamentales	4
17	Zonas residenciales	5
18	Área industrial	5
19	Área de uso comercial	5
20	Educación y cultura	5
21	Salud y bienestar	5
22	Entidad gubernamental y pública	5
23	Cementerio	5
24	Edificios	5
25	Botadero, relleno, tajo	5
26	Carreteras, caminos y autopistas	5
27	Casas aisladas	5
28	Transporte y almacenamiento	5

Modificado de (Araya, 2012)

## Valoración de la Precipitación

En cuanto al criterio de precipitación considera de mayor prioridad las zonas donde existan tormentas con mayores intensidades y dicha prioridad disminuye conforme las intensidades lo hacen.

La valoración de este criterio se basó en metodología Mora-Vahrson tomando en cuenta las lluvias diarias máximas para un periodo de retorno de 100 años, sin embargo se usaron los datos del mapa de zonificación climatológico establecido por (Orozco, 2007) donde se calculo la precipitación máxima horaria para un período de retorno de 25 años haciendo una transformación con el método de Elías y Ruiz por lo que la valoración de la lluvia queda como:

Lluvias máximas Horaria (mm)	mm/hr	Valoración
<31	Muy bajo	1
32-70	Bajo	2
71-109	Medio	3
110-147	Alto	4
>148	Muy alto	5

Modificado de (Mora, Vahrson, & Mora, 1992)

## Valoración de la Sismicidad

Para determinar el aporte de la sismicidad se utiliza el registro de los eventos sismológicos de los últimos 100 años y según intensidad en escala de Mercalli se asigna un peso. Para establecer la escala de los pesos se utiliza la metodología Mora-Vahrson.

La valoración del criterio se asignó según el siguiente cuadro como:

Intensidad (Mercalli-Modificada)	Características	Valoración
III	Leve	1
IV	Muy bajo	2
V	Bajo	3
VI	Moderado	4
VII	Medio	5
VIII	Elevado	6
IX	Fuerte	7
X	Bastante fuerte	8
XI	Muy fuerte	9
XII	Extremadamente fuerte	10

(Mora, Chaves, & Vázquez, 2002)

## Valoración de la Inspección

Se efectuó la inspección de 2 tramos de carretera y se hizo el levantamiento de patologías tanto de taludes como de estructuras, para asignarles una valoración adecuada según su severidad.

La determinación de la valoración obedece a una base bibliográfica de manuales para determinar el estado de obras geotécnicas y a la consulta de expertos en el área.

La valoración del criterio se asigna de manera que:

<b>Cuadro 11. Valoración de la inspección visual</b>				
<b>Estructura</b>	<b>Daño</b>	<b>Valoración según severidad</b>		
		<b>Alta</b>	<b>Media</b>	<b>Baja</b>
<b>Talud</b>	Movimientos (Volcamiento / deslizamientos)	5		
	Caída de material en superficie	3	2	1
	Erosión	3	2	1
	Agrietamiento (Cuerpo, corona, pie, o carretera en terraplén)	5		
	Hundimiento de corona	5		
	Hundimiento de subrasante	5		
	Levantamiento del pie del talud	5		
	Socavación del pie	5		
	Deformación de estructuras adyacentes	2	1	1
<b>Drenajes</b>	Taponamiento de drenajes profundos	4	3	2
	Obstrucciones en drenajes	4	3	2
	Agrietamiento en drenajes	4	3	2
	Rotura drenajes	5	4	3
	Inexistencia de drenaje	5		
<b>Estructuras de Contención</b>	Falla parcial o total	5		
	Erosión superficie	3	2	1
	Daño por impacto	4	3	2
	Socavación	4	3	2
	Agrietamiento	4	3	2
	Desplazamiento juntas	4	3	2
	Erosión Juntas	3	2	1
	Vegetación	1	1	1
	Corrosión	3	2	1
	Exposición del refuerzo	4	3	2
<b>Pantallas y Anclajes</b>	Daño o pérdida de cabezal	5	4	3
	Desprendimiento de cobertura rígida	4	3	2
	Corrosión	3		
	Fisuramiento de pantalla	3		

(Fuente: Consulta a expertos)



# Resultados

## Zona de estudio

De los 202.31 kilómetros cuadrados que tiene el cantón el modelo abarca alrededor de 75 kilómetros cuadrados dentro de los cuales se encuentran las carreteras nacionales del cantón en estudio.

Existen básicamente 3 rutas nacionales con una longitud total de 43 kilómetros lineales:

- **Ruta 219:** atraviesa los distritos de San Rafael, Cot, Potrero Cerrado y Santa Rosa, Ruta que comunica al Volcán Irazú.
- **Ruta 230:** Ella empieza en la ruta 219, en el distrito de Cot se dirige al distrito de Cipreses.
- **Ruta 402** Es una ramificación de la ruta 219 la cual se dirige al Norte rumbo al distrito de Santa Rosa.

De la zona de estudio es importante anotar que existe una falla al norte del cantón que atraviesa la ruta 219 y ruta 402. La falla se muestra en la figura 52 de este apartado.

## Evaluación Multicriterio

Tal como se planteó en la metodología se evaluaron 2 metodologías multicriterio (el método de la entropía y el método CRITIC)

Luego de efectuar la consulta a expertos del tema se procedió a realizar la matriz de evaluación, se normalizaron los datos obtenidos y se procedió a efectuar las metodologías. El resultado de cada una de las evaluaciones multicriterio se muestra en los cuadros 11 y 12 como sigue:

**Cuadro 12. Resultado de la aplicación de la metodología de evaluación CRITIC**

Criterios	Pesos Normalizados
Desarrollo del territorio	0,111
Cercanía con los asentamientos humanos.	0,113
Topografía	0,117
Estructuras Geológicas	0,108
Tipo de suelo	0,106
Cobertura del suelo	0,068
Precipitación	0,116
Sismicidad	0,104
Inspección Visual	0,157

(Fuente: el autor)

**Cuadro 13. Resultado de la aplicación de la metodología de evaluación de la Entropía**

Criterios	Pesos
Desarrollo del territorio	0,089
Cercanía con los asentamientos humanos	0,094
Topografía	0,129
Estructuras Geológicas	0,144
Tipo de suelo	0,129
Cobertura del suelo	0,101
Precipitación	0,130
Sismicidad	0,077
Inspección Visual	0,107

(Fuente: el autor)

A su vez el resultado del cálculo de la distancia de Manhattan para cada una de las metodologías

respecto al promedio de las evaluaciones se muestra en el siguiente cuadro, de manera que:

<b>Cuadro 14. Resultado del cálculo de la distancia de Manhattan</b>						
<b>Criterios</b>	<b>Promedio</b>	<b>Promedio normalizado</b>	<b>Pesos por método CRITIC</b>	<b>Distancia x100</b>	<b>Pesos por método Entropía</b>	<b>Distancia x100</b>
Desarrollo del territorio	0,105	0,090	0,111	2,076	0,089	0,046
Cercanía con los asentamientos humanos	0,108	0,092	0,113	2,052	0,094	0,193
Topografía	0,153	0,131	0,117	1,439	0,129	0,179
Estructuras geológicas	0,165	0,141	0,108	3,320	0,144	0,249
Tipo de suelo	0,149	0,128	0,106	2,193	0,129	0,107
Cobertura del suelo	0,112	0,096	0,068	2,808	0,101	0,447
Precipitación	0,155	0,133	0,116	1,614	0,130	0,309
Sismicidad	0,095	0,081	0,104	2,289	0,077	0,410
Inspección Visual	0,125	0,107	0,157	4,956	0,107	0,053
<b>Distancia Manhattan</b>			<b>CRITIC</b>	<b>22,747</b>	<b>Entropía</b>	<b>1,994</b>

(Fuente: el Autor)

## Comprobación de Distribución Normal de datos

El resultado de la comprobación de la distribución normal de datos se muestra a continuación, donde:

<b>Cuadro 15. Resultado del Análisis de datos.</b>				
<b>Criterios</b>	<b>Distribución Normal</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación estandar</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>
Desarrollo del territorio	OK	0.105	0.054	51%
Cercanía con los asentamientos humanos	OK	0.108	0.051	48%
Topografía	OK	0.153	0.082	53%
Estructuras Geológicas	OK	0.165	0.073	44%
Tipo de suelo	OK	0.149	0.076	51%
Cobertura del suelo	OK	0.112	0.048	43%
Precipitación	OK	0.155	0.082	53%
Sismicidad	OK	0.095	0.052	55%
Inspección Visual	OK	0.125	0.066	53%

(Fuente: el autor)

Donde se observa que todos los Criterios cumplen con la Distribución Normal de datos.

# Inspección

La inspección se realizó en 2 tramos de las carreteras nacionales que atraviesan el cantón de Oreamuno.

## Primer tramo

El primer tramo comienza en el cruce entre la ruta 233 y la ruta 219 (en el distrito de San Rafael), de allí se inspeccionó la ruta 219 hasta el sitio de falla en el distrito de potrero cerrado al Norte del Cantón.

Las características del tramo de inspección se resumen en el siguiente cuadro:

<b>Cuadro 16. Características del Primer tramo de Inspección.</b>	
Ruta	219
Secciones de control	30250/ 30491 30240
Sentido de Levantamiento	S-N
Longitud Inspeccionada (m)	15000
Cantidad de Obras Geotécnicas	2
Cantidad de Patologías en Laderas y Taludes	5

(Fuente: El autor)

En la zona existen muy pocas obras geotécnicas y taludes con problemas geotécnicos que puedan observarse por medio de la inspección visual por lo que el inventario fue reducido.

Algunas de las obras geotécnicas y problemas geotécnicos se muestran en las figuras 48, 49 y 50.



**Figura 47.** Ladera, Estación 1+154 (Fuente: el autor)



**Figura 48.** Estructura, Estación 1+575 (Fuente: el autor)



**Figura 49.** Talud C, Estación 1+605 (Fuente: el autor)

Y el resultado de la inspección de campo para el primer tramo da como resultado el siguiente inventario donde:

<b>Cuadro 17. Inventario de Inspección para el tramo 1</b>							
<b>Coordenadas</b>		<b>Estructura o Talud</b>		<b>Ruta</b>	<b>Sentido</b>	<b>km inicial</b>	<b>Lado</b>
<b>x</b>	<b>y</b>						
511404	1093050	A	Ladera	219	Sur-Norte	1+254	I
511643	1092996	B	Muro Anclado	219	Sur-Norte	1+575	D
511708	1092950	C	Talud	219	Sur-Norte	1+605	I
513196	1097231	D	Talud	219	Sur-Norte	10+551	I
513534	1098323	E	Talud	219	Sur-Norte	12+970	I
514155	1098995	F	Talud	219	Sur-Norte	14+840	I

(Fuente: el autor)

## Segundo Tramo

El segundo tramo de inspección parte del cruce entre la ruta 219 y la ruta 230 (en el distrito de Cot), de allí se inspeccionó un tramo de la ruta 230 en dirección hacia el distrito de Cipreses.

Las características del tramo de inspección se resumen en el siguiente cuadro:

<b>Cuadro 18. Características del Segundo tramo de Inspección.</b>	
Ruta	230
Secciones de control	30230
Sentido de Levantamiento	S-N
Longitud Inspeccionada (m)	8450
Cantidad de Obras Geotécnicas	0
Cantidad de Patologías en Laderas y Taludes	1

(Fuente: El autor)

El tramo inspeccionado no hay estructuras geotécnicas construidas. Solamente hay 2 patologías en una ladera natural y en un talud. Las siguientes 2 figuras las patologías encontradas.



**Figura 50.**Ladera, Estación 12+970 (Fuente: el autor)



**Figura 51.**Talud, Estación 14+840 (Fuente: el autor)

De igual manera el siguiente cuadro resume los resultados de la inspección del segundo tramo de manera que:

<b>Cuadro 19. Inventario de Inspección para el tramo 2</b>							
<b>Coordenadas</b>		<b>Estructura o Talud</b>		<b>Ruta</b>	<b>Sentido</b>	<b>km inicial</b>	<b>Lado</b>
<b>x</b>	<b>y</b>						
516133	1093404	A	Ladera	230	Oeste-Este	7+052	D
517345	1093600	B	Talud	230	Oeste-Este	11+859	I

(Fuente: el autor)

## Resumen de Patologías para el Cantón de Oreamuno

El resultado de la inspección visual se resume en el siguiente cuadro:

<b>Cuadro 20. Resultado de la Inspección Visual de las estructuras geotécnicas en rutas nacionales (Oreamuno, Cartago)</b>							
<b>Código</b>					<b>Patología</b>	<b>Severidad</b>	<b>Valoración</b>
<b>Estructura</b>	<b>Ruta</b>	<b>Sentido</b>	<b>Lado</b>	<b>km-inicial</b>			
L	219	S-N	I	1+254	Deslizamiento traslacional	Alta	5
MA	219	S-N	D	1+575	-	-	0
T	219	S-N	I	1+605	Erosión superficial	Media	2
T	219	S-N	I	10+551	Caída de material	Baja	1
T	219	S-N	I	12+970	Caída de material	Baja	1

T	219	S-N	I	14+840	Caída de material	Baja	1
L	230	O-E	D	7+052	Caída de material	Baja	1
T	230	O-E	I	11+859	Erosión superficial	Alta	3

(Fuente: el autor)

## Resultado de valoración de Criterios

En las siguientes figuras se muestran los resultados de la valoración de algunos de los criterios. Se procedió a la construcción de mapas por medio de *ArcGIS*.

En la figura 52 es posible observar la composición de la zona de estudio, la ubicación y recorrido de cada una de las carreteras nacionales de la zona así como la ubicación de la falla que atraviesa la zona.

En la figura 53 se muestra el resultado de la valoración del criterio del desarrollo del territorio. Se denotan dos áreas bien claras de desarrollo, los distritos de Santa Rosa, Potrero Cerrado y San Rafael tienen un desarrollo medio mientras que Cot y Cipreses muestran un desarrollo del territorio alto.

La figura 54 muestra el resultado de la evaluación de la cercanía con los asentamientos humanos según la información suministrada por el INEC. Cabe anotar que predomina una cercanía baja con los asentamientos humanos siendo distinto en los centros de población.

La figura 55 muestra el resultado de la evaluación de la topografía donde se tomó como base la cartografía de las hojas Carrillo e Istarú en escala 1:50 000 del IGN. Para ello se procedió a la determinación de las pendientes que presenta el cantón según como se detalla en la metodología expuesta.

La figura 56 muestra los resultados de la evaluación de la precipitación para la zona tomando como base la metodología Mora-Vahrson y el mapa de zonificación climatológica efectuado por (Orozco, 2007). Para el cantón se encontró

que sus precipitaciones rondan entre medias y altas siendo estas más altas en la zona norte del cantón.

El resultado de la valoración y georeferenciación de la inspección se muestra en la figura 57. En ella se denota la poca cantidad de estructuras geotécnicas en el cantón.

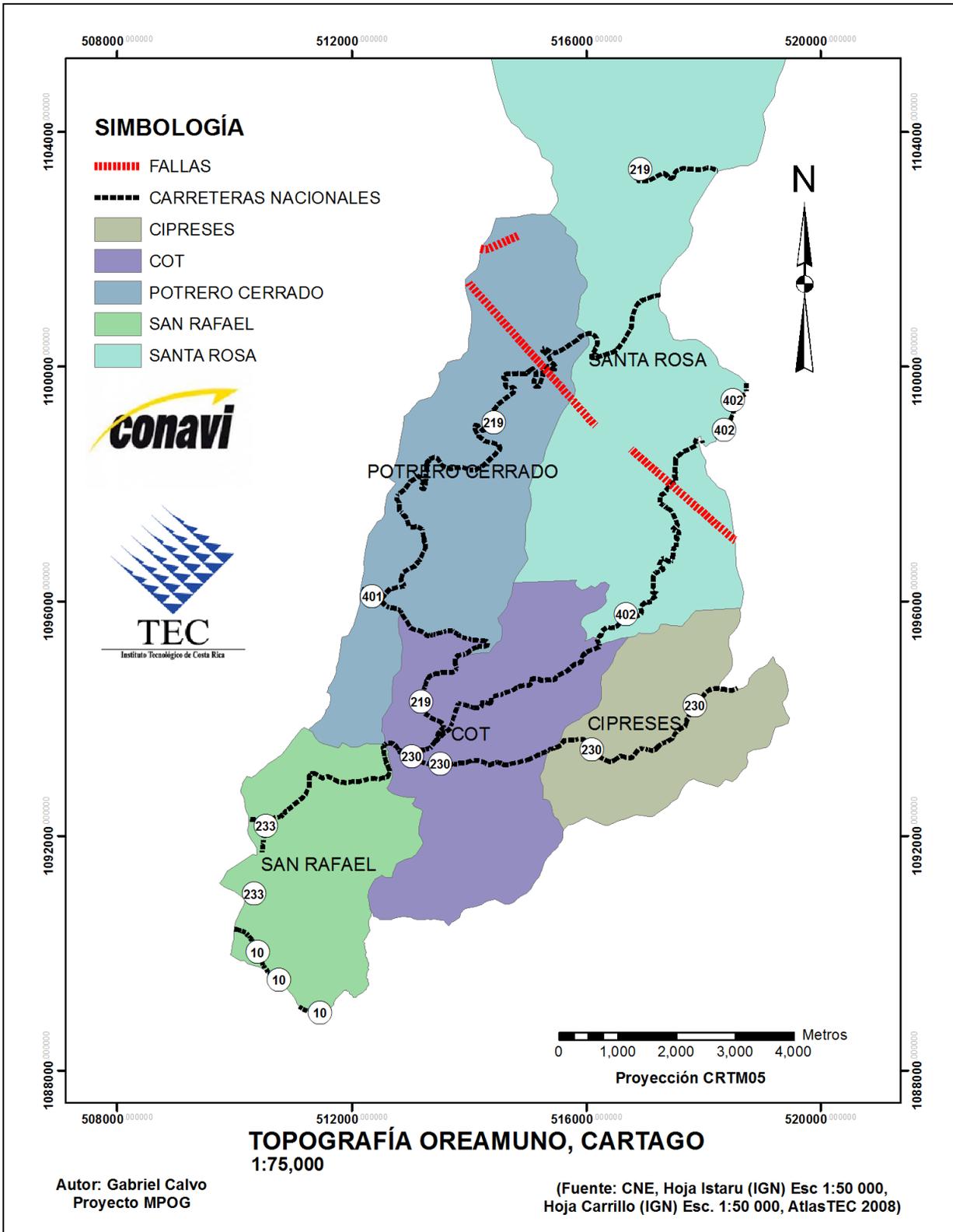


Figura 52. Zona de Estudio (Oreamuno, Cartago)

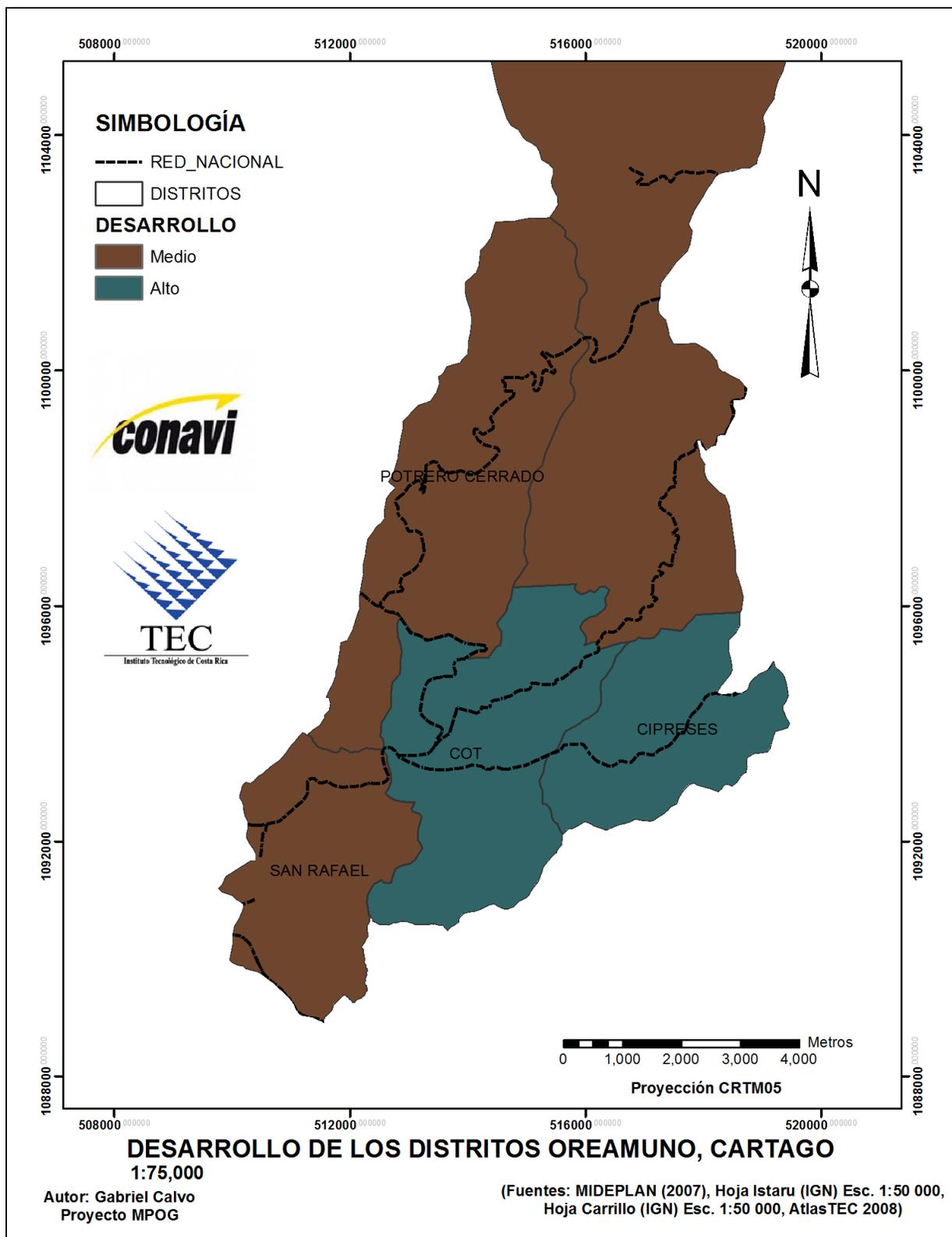


Figura 53. Resultados de la Valoración del desarrollo del territorio (Oreamuno, Cartago)

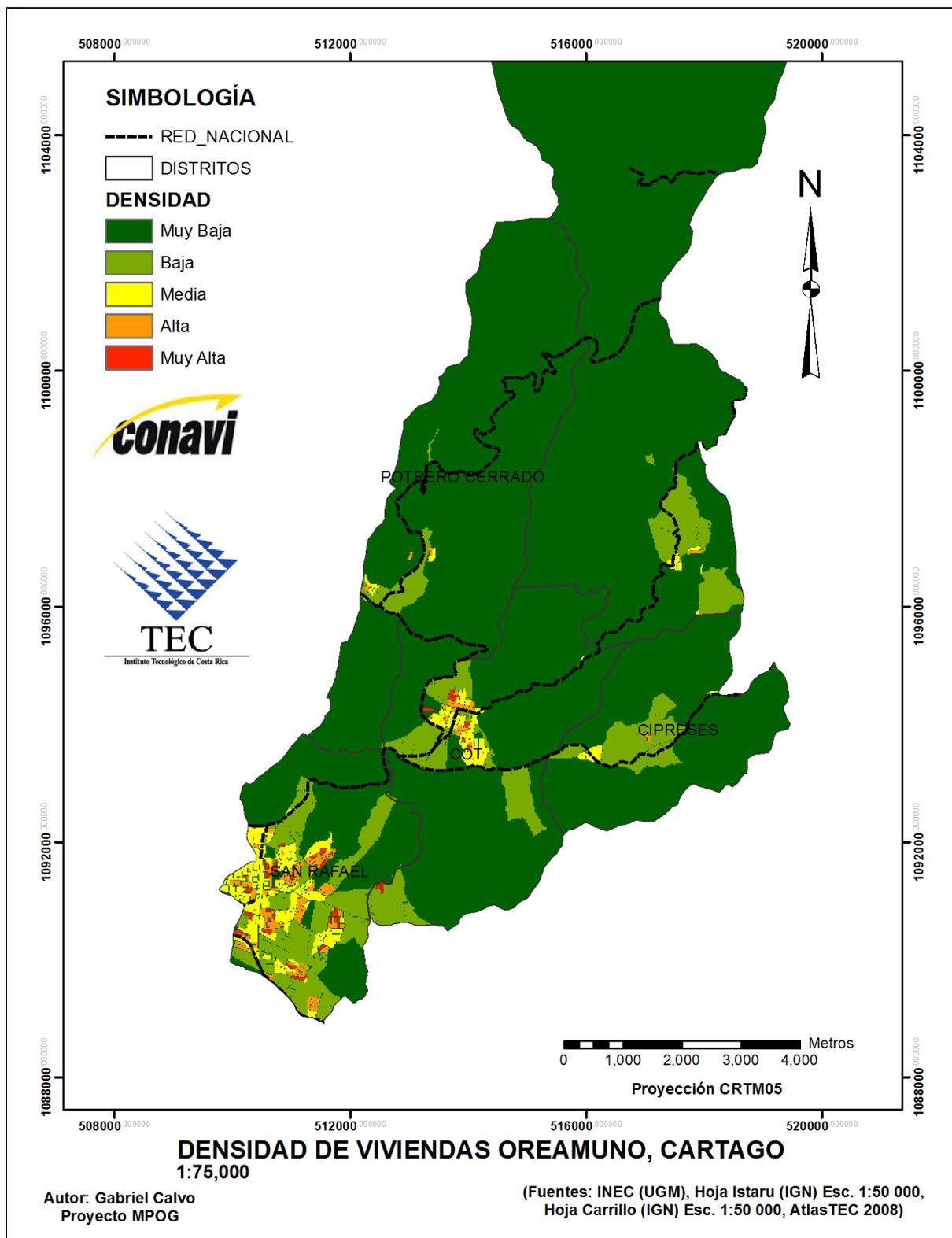


Figura 54. Resultados de la Valoración de cercanía con los asentamientos humanos

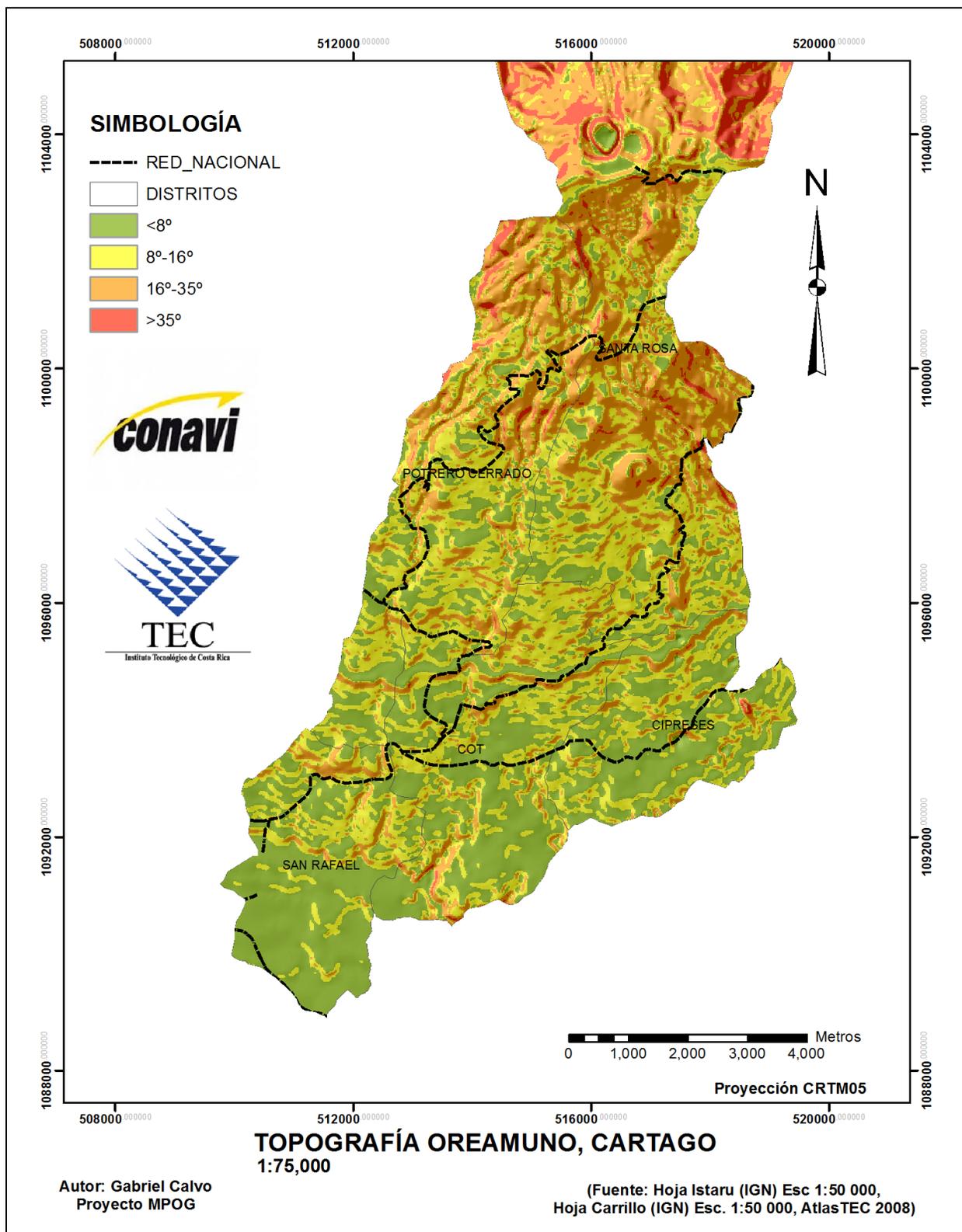


Figura 55. Resultados de la Valoración de la topografía (Oreamuno, Cartago)

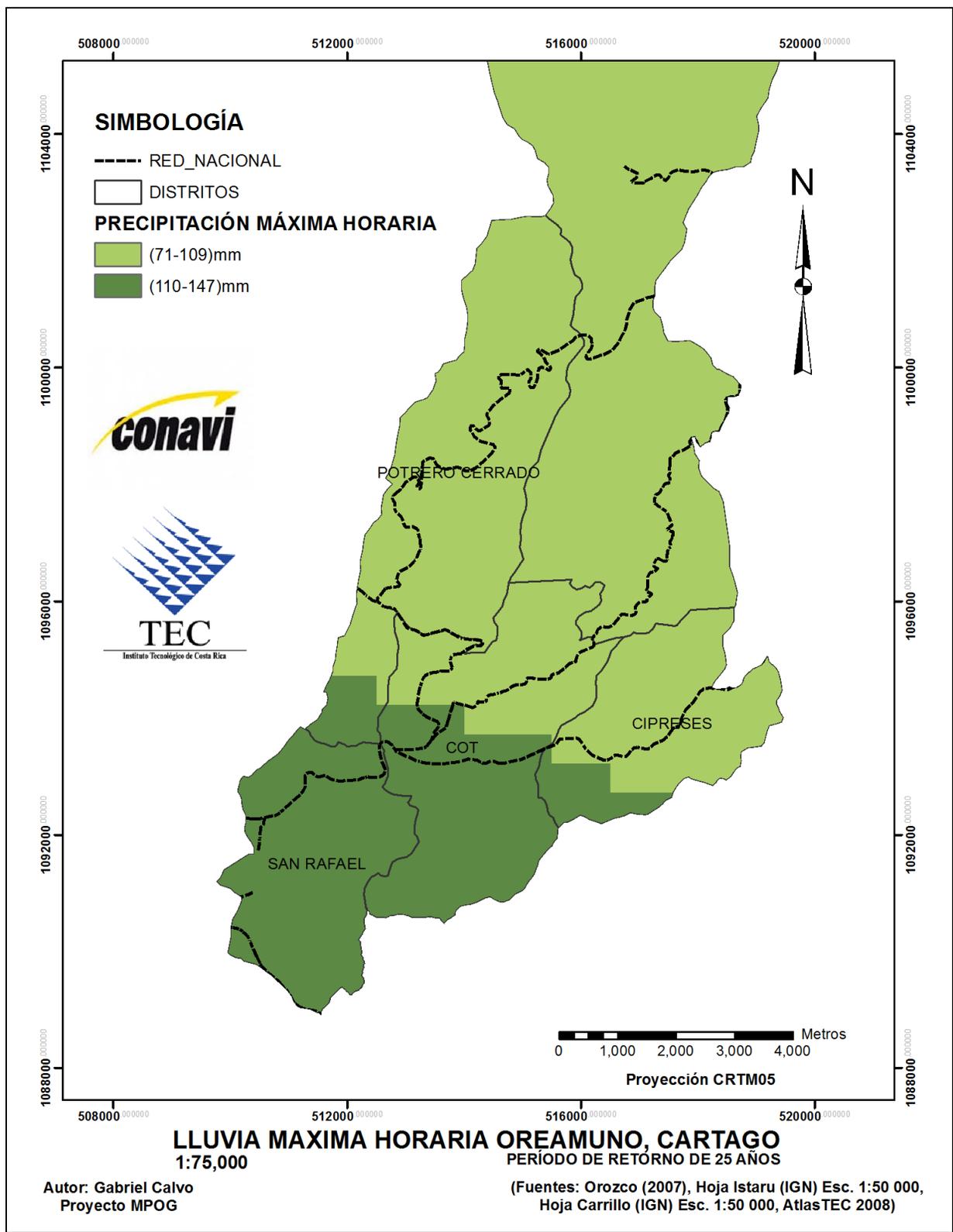


Figura 56. Resultados de la Valoración de la precipitación máxima (Oreamuno, Cartago)

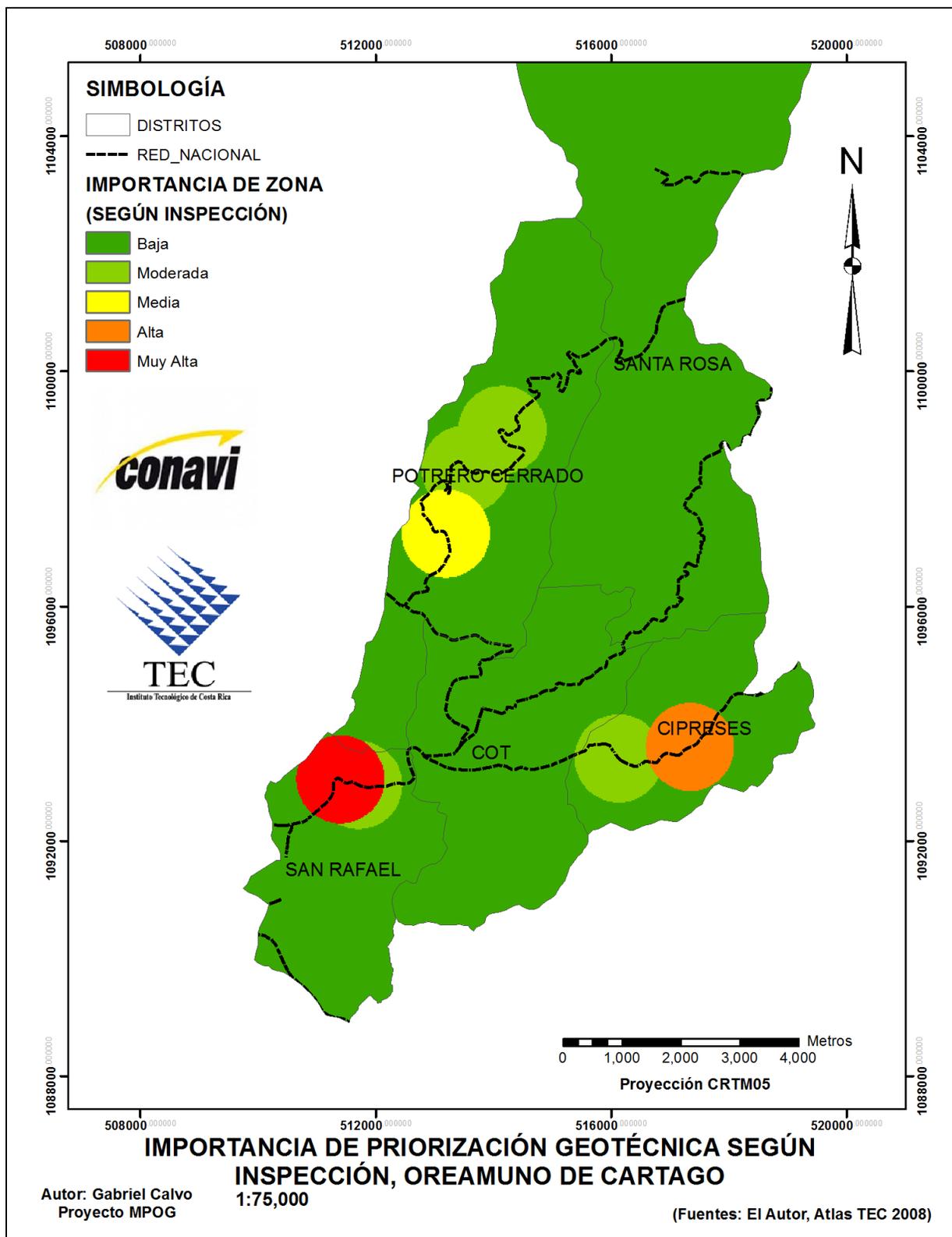


Figura 57. Resultados de la Valoración de la Inspección de Obras Geotécnicas (Oreamuno, Cartago)



# Análisis de Resultados

## Consulta a Profesionales

La población entrevistada fue de un total de 25 profesionales donde las características de la población entrevistada se pueden ver en la figura 58.



**Figura 58.** Características de la Población consultada (Fuente: el autor)

La población escogida acoge profesionales multidisciplinarios que unidos dan una respuesta certera al problema planteado. Es por ello que la consulta abarca profesionales de:

Conservación vial: quienes se dedican a la conservación vial (ingenieros de zona del CONAVI), siendo ellos quienes deben priorizar las obras geotécnicas en carreteras.

- Profesionales geotecnistas: siendo ellos quienes tienen la experiencia y el

conocimiento de que factores inciden en la ocurrencia de problemas geotécnicos.

- Profesores investigadores: quienes tienen las bases teóricas para dar un criterio certero del estudio.
- Profesionales de áreas relacionadas: siendo ellos conocedores de factores específicos que puedan influir directa o indirectamente en la ocurrencia de problemas geotécnicos.

Respecto al tamaño de la población, se considera adecuada ya que:

- Luego del análisis de los datos, estos cumplen con el cálculo de la distribución normal de datos.
- Incluye profesionales de las diversas áreas involucradas.
- Si el número de profesionales hubiera sido excesivo, la consulta hubiera tardado muchísimo tiempo más por lo que el estudio no sería práctico.

## Ponderación de Criterios

Luego de realizar la evaluación multicriterio y por medio del análisis de la distancia de Manhattan se determinó que el método de la Entropía es el más apropiado para el caso en estudio.

La ponderación final según el método de la Entropía determina que la mayor importancia la tienen los aspectos ambientales con un 71%, seguido de los aspectos socio-económicos con un 18% y por último los aspectos in-situ con un 11%.

El criterio que posee mayor peso es el de las estructuras geológicas, seguido de la precipitación, la topografía y el tipo de suelo, lo que

demuestra que en general, estos criterios son de los más importantes a la hora de decidir donde intervenir.

Para el caso del sismo, según la investigación bibliográfica es un factor detonante de suma importancia, pero para el modelo tiene el menor peso (7.7%). Esto puede suceder por la gran incertidumbre de este factor siendo los sismos eventos sumamente difíciles de predecir tanto en magnitud, como intensidad y localización. Esto se demuestra por alto coeficiente de variación al efectuar la consulta (55%).

En general todos los criterios tienen un coeficiente de variación muy alto con lo que se observa que hay gran cantidad de puntos de vista poniendo en evidencia la dificultad para determinar los pesos adecuados.

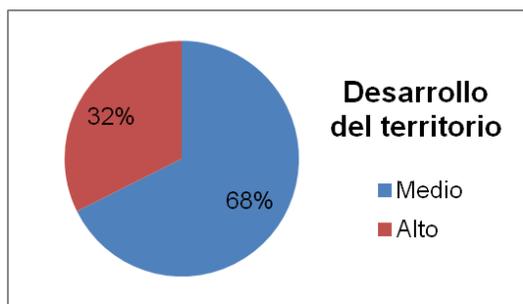
## Aspectos Socio-económicos

En general el peso o importancia en el modelo de los aspectos socio-económicos es muy baja, sus datos, causas y efectos se analizan a continuación:

### Desarrollo del territorio

El Cantón de Oreamuno es una zona meramente rural que presenta un Índice de desarrollo entre medio y alto donde los distritos de Cot y Cipreses muestran ser las zonas más desarrolladas del cantón.

Para la aplicación del caso de estudio (zona de Oreamuno) la distribución del desarrollo del territorio se muestra en la siguiente figura donde:



**Figura 59.** Distribución del desarrollo de Oreamuno de Cartago (Fuente: el autor)

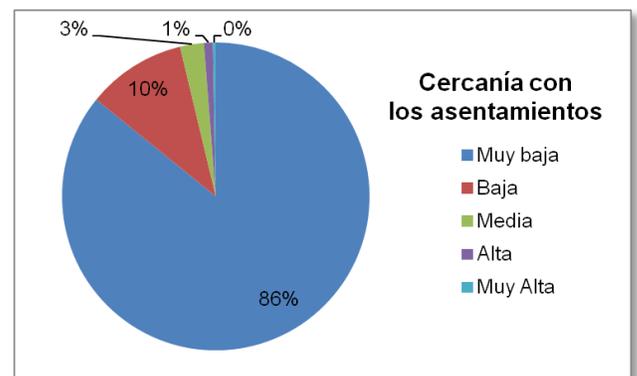
En casos de estudio como este donde la zona estudio tiene un índice de desarrollo parecido en toda su área, este criterio no tendría una importancia primordial, sin embargo, si se analizan zonas de estudio más amplias donde existan diferencias notorias del desarrollo del territorio este podría ser un punto clave para determinar cuál zona priorizar.

### Cercanía con los asentamientos humanos

Luego de la analizar la valoración de la cercanía con los asentamientos humanos se determinaron dos aspectos importantes.

El primero es que la valoración de la cercanía con los asentamientos por medio de la densidad de viviendas aporta la información requerida, ya que por ejemplo, siendo Oreamuno un cantón meramente rural se esperaba una valoración muy baja siendo este el resultado obtenido.

Como segundo aspecto se tiene que, para la zona en estudio este criterio tiene una importancia muy baja.



**Figura 60.** Distribución de la Cercanía con los Asentamientos Humanos Oreamuno de Cartago (Fuente: el autor)

En general los problemas geotécnicos suceden en carreteras de montaña, donde las densidades de construcciones son muy bajas, en general este criterio permite dar un peso a los centros de población urbana, de manera que se tomen en cuenta las modificaciones que se da al

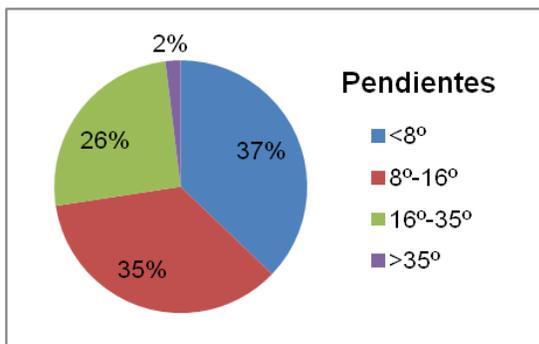
terreno en estas zonas, sin embargo para el caso en estudio el peso al modelo producto de la valoración de este criterio es muy bajo.

## Aspectos Ambientales

Para los criterios ambientales se determinaron distintas valoraciones siendo estos criterios los que más variación tienen en sus resultados. El análisis de cada uno de los criterios se resume a continuación:

### Topografía

Para el caso de estudio, el resultado de la valoración de la topografía tiene una distribución de las pendientes del terreno tal que:



**Figura 61.** Distribución de la Valoración de la topografía del Cantón (Fuente: el autor)

Donde aproximadamente el 72% de la zona en estudio tiene pendientes Baja-Moderadas. A esto se debe sumar que las zonas con pendientes muy fuertes se encuentran al Norte del Cantón y lejos de las carreteras nacionales (700m).

La evaluación de este criterio es especialmente difícil ya que se debe contar con

topografía actualizada que considere los constantes cambios que existen en el terreno.

En general y tal como lo exponen diversos autores, la topografía es una condición original que sumada a los demás factores deteriorantes y detonantes generan gran cantidad de deslizamientos y problemas geotécnicos.

### Estructuras Geológicas

Oreamuno presenta una falla que atraviesa los distritos de Potrero Cerrado y San Rosa.



**Figura 62.** Zona sobre de falla ruta 219 Oreamuno, Cartago (Fuente: el autor)

Producto de la inspección de campo no se anotaron señales de movimientos ni estructuras geotécnicas alrededor, sin embargo, es importante tener monitoreado estas zonas de falla de manera que puedan tomarse las previsiones del caso. Según la experiencia de los ingenieros de las diversas zonas del país encargados del mantenimiento de carreteras estos puntos donde muy vulnerables a problemas geotécnicos y que han ocasionado amplias inversiones en intervención por imprevisiones.

### Tipos de Suelo

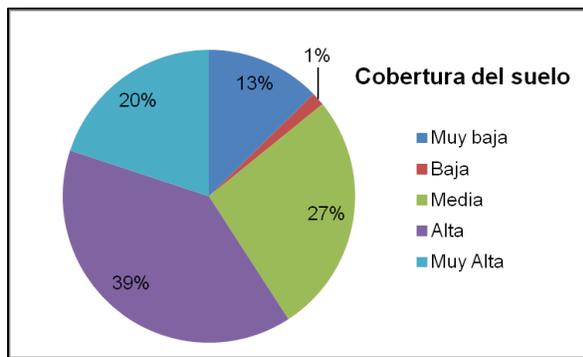
Según el estudio de los mapas geotécnicos presentados por (Bogantes, Laporte, Quesada, & Vásquez) se determinó que la zona de estudio tiene suelos de origen volcánico, con facies proximales de rocas volcánicas recientes. Las edades de este suelo son del periodo cuaternario. Se componen de coladas de Lava, aglomerados, Lahares y cenizas volcánicas y estratigráficamente provienen de rocas volcánicas intrusivas someras. Es por ello que se valoró la

zona como 3 (valoración Media). Este resultado es similar al expuesto por (Barrantes, Barrantes, & Núñez, 2011) en una zona de características litológicas similares lo que justifica su valoración.

En general las características físicas de los terrenos que conforman el cantón de Oreamuno (sector volcánico alterado) junto con la pendiente, favorece la generación de deslizamientos por lo que la correcta evaluación de este criterio es de suma importancia.

## Cobertura del suelo

Luego del análisis de las distintas escorrentías se obtuvieron los siguientes resultados:



**Figura 63.** Distribución de la Valoración de la Cobertura del suelo (Fuente: el autor)

Donde se tiene que aproximadamente el 41% de la cobertura del suelo tiene una importancia baja (para la priorización geotécnica) mientras que un 39% tienen una importancia alta (zona de pastizales y algunos sembradíos) y el 20% tiene una prioridad muy alta.

Un punto importante a señalar es que aunque el cantón es meramente rural, por el uso que se le da al terreno, la valoración de la cobertura del suelo llega a tener un peso importante con zonas de cobertura muy alta en ciertos sectores, es por ello que, debe realizarse una valoración adecuada de este criterio.

En general la cobertura del suelo determina indirectamente la permeabilidad del terreno. Este factor en muchos casos tiene incidencia de problemas geotécnicos asociados.

## Precipitaciones

Oreamuno presenta intensidades de precipitaciones de medias a altas donde pueden ocurrir tormentas con intensidades entre 71mm y 147mm (según estimaciones de Orozco (2007) para un periodo de retorno de 25 años).

Estas lluvias pueden ser más intensas en la zona cercana a San Rafael (cabecera del cantón) y en la zona Norte (en Santa Rosa, zona cercana al Volcán Turrialba), por lo cual son zonas de gran importancia de observación y monitoreo.

Es de vital importancia tener información precisa del clima de la zona por lo que debería tenerse acceso a la información de las estaciones meteorológicas cercanas, para que de esta manera, se puedan tener registros recientes y completos que puedan ayudar a predecir la ocurrencia de eventos climáticos extraordinarios que incidan en la ocurrencia de problemas geotécnicos.

Hay que recordar que diversos autores señalan a las precipitaciones como una de las principales fuentes de problemas geotécnicos asociados por lo que una valoración óptima y precisa de este criterio es necesaria.

## Sismicidad

Para establecer la valoración por actividad sísmica se utilizó la metodología Mora-Vahrson para lo cual se realizó un estudio donde se utiliza el sismo más fuerte registrado durante los 100 últimos años para la zona en estudio.

El Cantón de Oreamuno se localiza cerca de dos fuentes sísmicas muy conocidas en el Valle Central, una de ellas localizada la sur de la ciudad de Cartago y a unos 6 km de la población de San Rafael.

En esta fuente se generaron los eventos de 2 setiembre de 1841 y 4 de mayo de 1910, que destruyeron la ciudad de Cartago y alrededores.

Por otro lado, existe otra fuente sísmica que se localiza hacia el flanco NE del Volcán Irazú, y que en 1952, generó el evento de Patillos, ocasionando una gran cantidad de derrumbes en los alrededores.

La actividad sísmica más fuerte registrada es la del 4 de mayo de 1910, con valoración de VII en la escala de Mercalli Este acontecimiento se sale del periodo de los 100 años de estudio que plantea la metodología Mora-Vahrson sin embargo por recomendaciones de expertos se utilizó esta

valoración para la zona en estudio. Esto tiene como efecto que la valoración de la amenaza sísmica tenga gran importancia en el modelo.

## Aspectos Ambientales

En general estos aspectos tienen gran importancia ya que dan a conocer las condiciones reales para un momento dado de la zona de estudio. Esto amplía la visión de los problemas que existen sobre las carreteras y en general la inspección llega a ser necesaria en cualquier obra siendo este un factor muy importante a tomar en cuenta independientemente del peso que este llegue a tener en el modelo final.

### Inspección

Previamente a efectuar la inspección se procedió a efectuar un mapa tomando en cuenta solamente aspectos ambientales, esto para determinar zonas que sean vulnerables a problemas geotécnicos por factores originales y deteriorantes que puedan afectar la zona (basado en la metodología Mora-Vahrson).

Al efectuar este mapa se puede obtener una idea a priori de los lugares que puedan presentar patologías o estructuras geotécnicas con problemas, sin embargo, es importante realizar la inspección de la totalidad de la ruta de manera que no se deje por fuera ninguna debida anotación.

Según la construcción de este mapa, Oreamuno presenta en general una susceptibilidad media con algunas zonas muy puntuales donde presenta susceptibilidad alta, esto estuvo muy acorde con los resultados de campo donde las patologías presentes en taludes y laderas fueron pocas y con mayor incidencia donde el mapa de factores ambientales así lo señalaba.

## Análisis de Factores

### Factores Ambientales

En el primer caso se planteó efectuar un análisis del cantón de Oreamuno tomando solamente factores ambientales (creando un mapa de zonificación de susceptibilidad a problemas geotécnicos o bien MZSPG).

Se realizó la valoración de cada criterio ambiental (tal como se muestra en el apartado de resultados) y se aplicaron los pesos de cada criterio pero normalizándolos de manera que se pudiera saber cuál era el comportamiento del modelo únicamente ante aspectos ambientales.

De igual manera se siguió la metodología de implementación del modelo donde a cada criterio se multiplicaba por el peso respectivo y por medio de la ayuda de funciones analíticas del ArcGIS (*Algebra de mapas*) se obtuvo un unificado del análisis de los factores ambientales.

Como resultado del primer análisis se anota que la zona de Oreamuno presenta una susceptibilidad a problemas geotécnicos media generalizada, donde, las zonas que pueden presentar mayores problemas geotécnicos se encuentran cerca de la falla que atraviesa el cantón así como las zonas cercanas al centro del distrito de Cot y algunas zonas aisladas de la ruta 219 y ruta 230.

Es de esperar que al efectuar la inspección no se encontraran muchos problemas geotécnicos con lo cual la priorización de la zona también se consideraría moderada. En la siguiente figura se señala con rojo las zonas con susceptibilidad a problemas geotécnicos (susceptibilidad alta).

Al solo evaluar aspectos ambientales el modelo queda planteado de manera muy teórica sin que haya una conexión directa de la parte práctica (estado de real de las obras geotécnicas)

por lo que sigue siendo indispensable una inspección visual de la ruta.

En la siguiente figura se muestra el resultado del mapa de los factores ambientales.

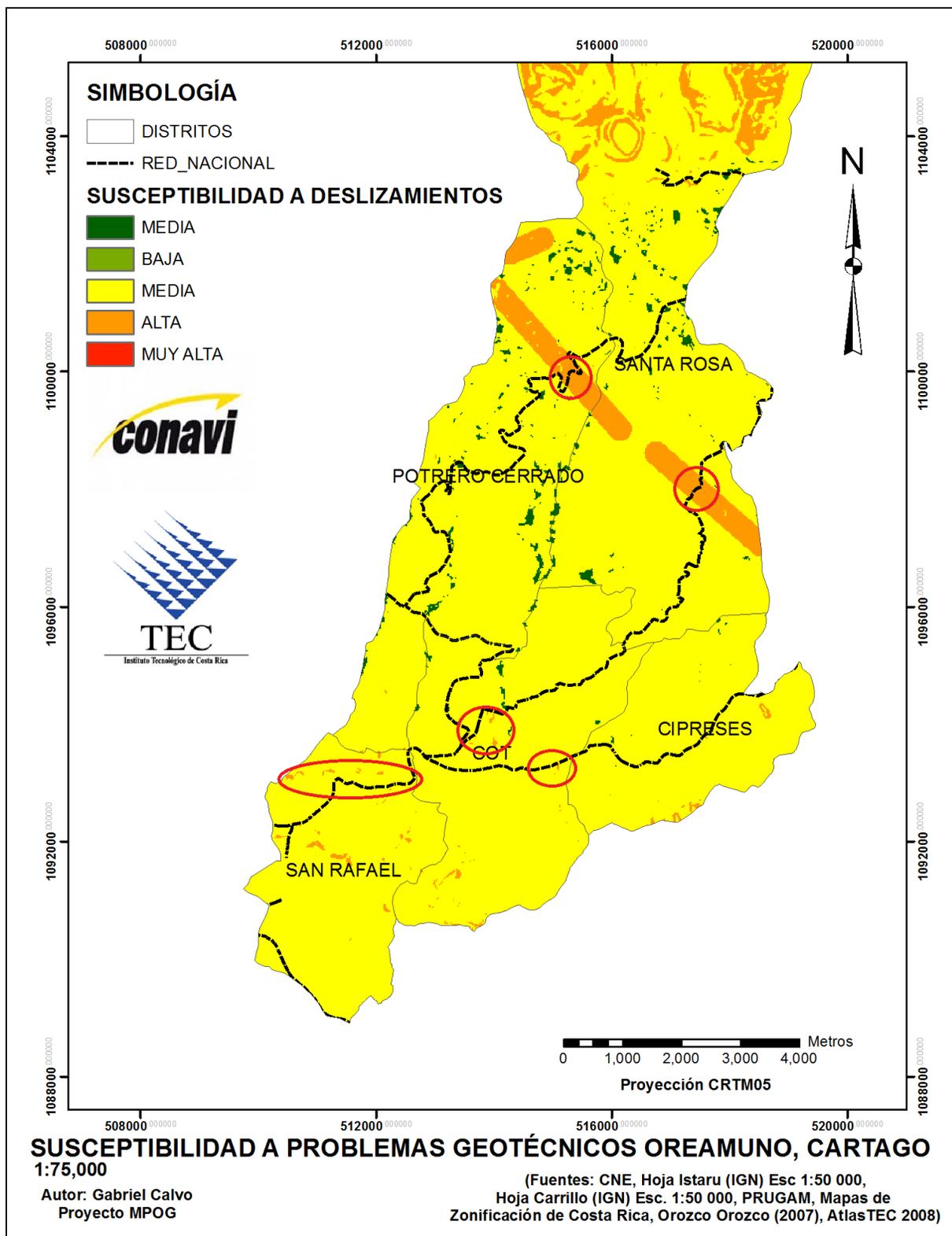


Figura 64. Mapa de Zonificación de susceptibilidad a problemas geotécnicos (Oreamuno, Cartago)

## **Factores socio-económicos y ambientales (Modelo inicial)**

Para este caso, se analizaron tanto los factores socioeconómicos y los factores ambientales en conjunto.

De igual manera se debió seguir la metodología de implementación del modelo donde a cada criterio se multiplicaba (para este caso los criterios socioeconómicos y ambientales) por el peso respectivo y por medio de la ayuda de funciones analíticas del ArcGIS (*Algebra de mapas*) se obtuvo un unificado del análisis.

Al tomar en consideración los factores socio-económicos el modelo de priorización elimina los puntos críticos de ocurrencia de problemas geotécnicos con lo que el modelo predice que la priorización de la zona en general debe de ser Moderada centrandó únicamente la atención las zonas cercanas a la falla presente.

El efecto de los criterios del desarrollo económico y de la cercanía a los asentamientos humanos para el caso en estudio, produce que, el cantón pase de tener una susceptibilidad a problemas geotécnicos media (análisis únicamente de criterios ambientales) a ser una zona de priorización geotécnica moderada.

Según sea el caso de estudio, los factores socioeconómicos pueden hacer que la importancia de priorización geotécnica aumente o disminuya drásticamente por lo que deberían de usarse para poder comparar zonas con distintos niveles de desarrollo.

Si bien es cierto, la consideración de factores socio-económicos es de suma importancia para la correcta determinación de un orden de priorización en temas geotécnicos. Al evaluar una zona donde las condiciones socio-económicas son similares en toda la zona de estudio, estos aspectos pasan a tener una importancia secundaria, donde los aspectos ambientales y del estado de las obras se convierten en los factores primordiales de evaluación.

Al hacer el modelo inicial en zonas donde los aspectos socioeconómicos no tienen gran importancia no ayudan a determinar qué zonas podrían tener problemas geotécnicos porque en general disminuye la importancia de priorización de toda la zona de estudio. De no efectuarse una inspección visual se podría caer en el error no atender problemas puntuales que puedan surgir.

El resultado del análisis del modelo de priorización evaluado en el cantón de Oreamuno de Cartago, sin tomar en cuenta aspectos in-situ, únicamente incluyendo factores socioeconómicos y ambientales se muestra en la siguiente figura, donde las zonas más críticas (con nivel de priorización media) se muestra encerrada en rojo.

En general se muestra como Oreamuno de Cartago tiene una importancia de priorización geotécnica Moderada.

## **Factores in-situ (Inspección visual)**

En general la inspección es parte primordial de cualquier campo de la ingeniería, en diferentes etapas de los proyectos debe haber inspecciones ya que por medio de ella se pueden tomar las decisiones que mejor convengan.

Pueden existir casos donde luego de hacer la inspección visual y realizar el modelo de inspección final, el orden de priorización sea igual para todas las estructuras a intervenir por lo que se hace necesario establecer un orden priorización para tales casos. Se plantea utilizar en primera instancia la valoración del estado de cada una de las estructuras de manera que este determine su orden de priorización. Si aún así existe ambigüedad para determinar el orden de intervención de las estructuras se plantea utilizar el Índice de desarrollo social para determinar el orden de intervención donde el orden de priorización sea aquel donde se intervengan de primero las estructuras que se encuentren dentro de la zona con mayor desarrollo del territorio.

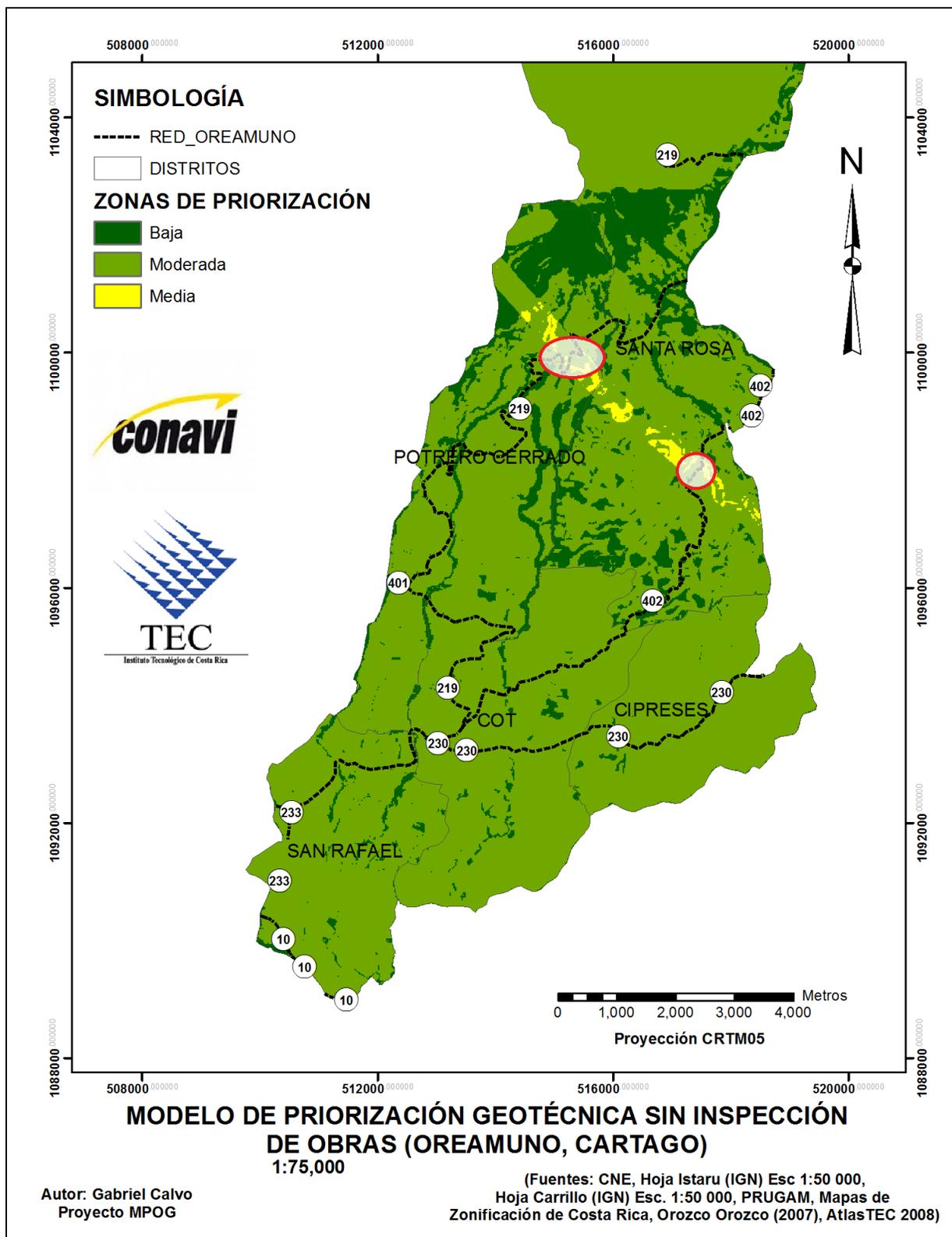


Figura 65. Modelo de Priorización Geotécnica sin Inspección (Oreamuno, Cartago)

# Modelo de Priorización de obras geotécnicas

Una vez valorada la inspección visual se procedió a seguir la metodología de implementación del modelo donde a cada criterio se multiplicaba por el peso respectivo y por medio de la ayuda de *Algebra de mapas* se sumaban las valoraciones multiplicadas por sus respectivos pesos para finalmente obtener el modelo final.

La inspección permitió conocer el estado de las estructuras geotécnicas construidas así como el estado de las laderas y taludes conformados que existen al primer semestre del año 2013 sobre las rutas nacionales. Los resultados de la inspección fueron acordes con el análisis de los aspectos ambientales. Esto ratifica que el modelo está debidamente calibrado por lo que sus resultados son confiables.

Para el caso en estudio, la inspección visual tuvo como resultado muy pocas patologías (en taludes) y obras geotécnicas construidas, tal como era de esperar (según lo mostrado en el análisis de los aspectos ambientales).

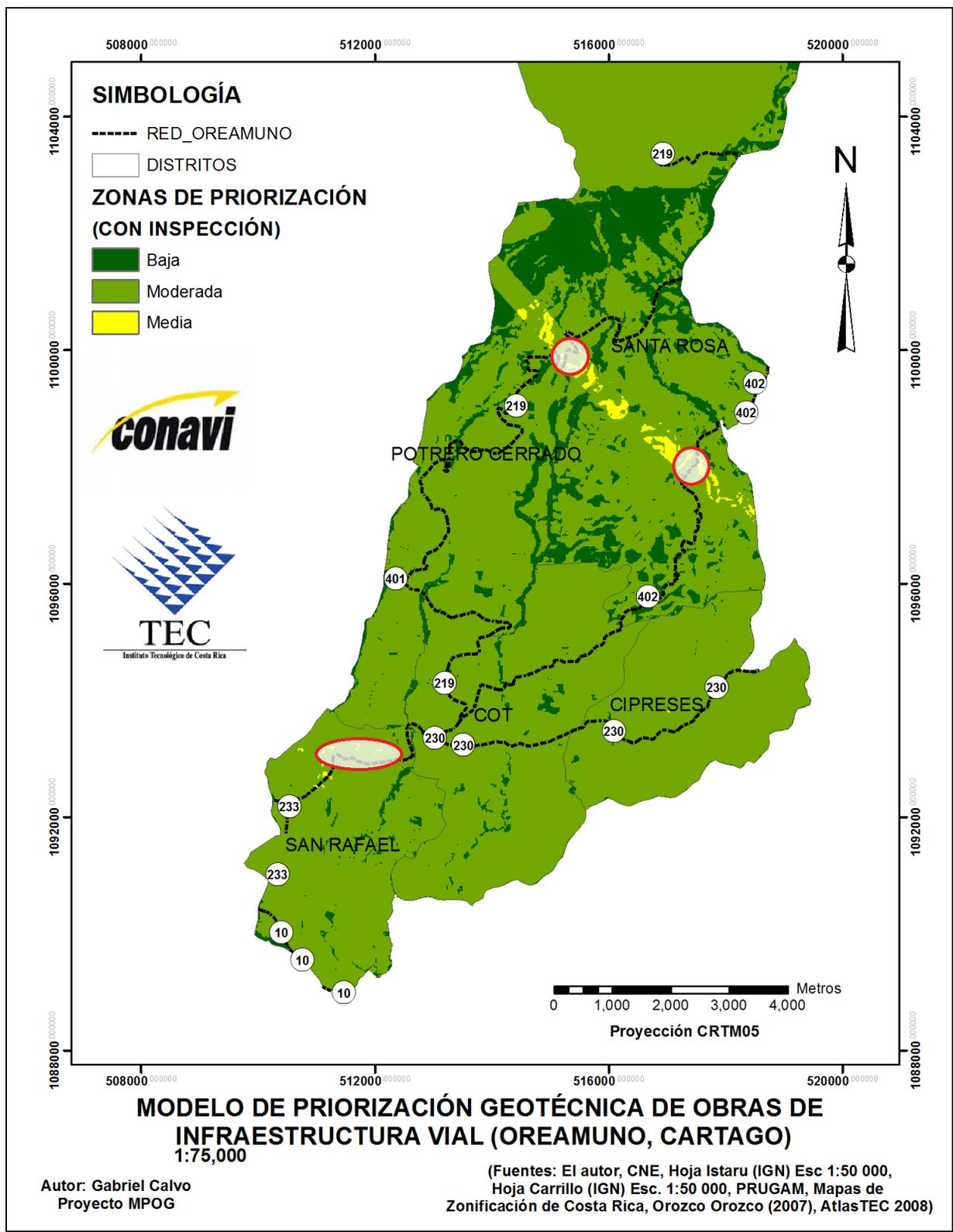
Al efectuar el modelo final que incluye los factores socio-económicos, se determinó que en general las rutas 219, 230 y 402 tienen una prioridad de intervención y mantenimiento moderada y solamente en puntos muy específicos (los cuales se señalan en rojo en la siguiente figura) hay un orden de priorización media.

El modelo determina el grado de necesidad de intervención de las distintas obras geotécnicas en la zona. Permite tener

conocimiento de que se debe intervenir, las dimensiones de los daños a tratar, para que de esta manera se puedan valorar los tipos de soluciones se le pueda dar a cada uno de los problemas, así como los posibles recursos que se deban utilizar.

En general la zona tiene baja influencia socio-económica, la priorización geotécnica está dominada por los aspectos ambientales especialmente por las precipitaciones y las modificaciones a la topografía (según lo determinan los pesos encontrados). No existen patologías o daños severos a estructuras con lo cual se determina que en general la priorización de la zona es media.

En la siguiente figura muestra el modelo de priorización por medio de un mapa tal como sigue:



**Figura 66.** Modelo de Priorización Geotécnica de Obras de Infraestructura vial (Oreamuno, Cartago)

Donde se tiene que las patologías encontradas y el orden de priorización debería de ser:

<b>Cuadro 21. Orden de Priorización De Obras Geotécnicas (Oreamuno, Cartago)</b>					
<b>Código</b>					<b>Orden de Priorización</b>
<b>Estructura</b>	<b>Ruta</b>	<b>Sentido</b>	<b>Lado</b>	<b>km-inicial</b>	
L	219	S-N	I	1+254	1
T	219	S-N	I	1+605	2
T	230	O-E	I	11+859	3
T	219	S-N	I	10+551	4
T	219	S-N	I	12+970	5
T	219	S-N	I	14+840	6
L	230	O-E	D	7+052	7
MA	219	S-N	D	1+575	8

(Fuente: el autor)



# Alcances y Limitaciones

- Este trabajo no pretende eliminar la necesidad de evaluación de condiciones particulares que se puedan presentar las cuales deban ser tratadas según estudios específicos o posibles eventualidades que surjan.
- El modelo se aplicó en el cantón de Oreamuno de Cartago a petición del CONAVI debido que ya se han generado estudios homólogos los que pueden ser integrados al proyecto.
- La aplicación del modelo incluye únicamente aspectos geotécnicos de la infraestructura vial, no se trabajó con otros elementos, como por ejemplo: obras de drenaje y estructuras de pavimentos.
- El modelo es dinámico de manera que de manera que al seguir la metodología planteada permite la actualización constante, esto a su vez permite observar la evolución de las obras geotécnicas.
- El trabajo no evalúa condiciones particulares de variaciones de altura, ancho, pendientes, existencia de gavetas o banqueos, posición del nivel freático, humedad, relación de vacíos, peso unitario, resistencia en condición drenada y no drenada y coeficiente sísmico, las cuales son particulares para cada sitio y varían mucho con respecto al tiempo. Estas condiciones requerirían de un estudio exhaustivo con un fin que no busca este trabajo.
- Este trabajo no pretende analizar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos ni zonificar las zonas de mayor amenaza geotécnica. Solamente pretende ser una ayuda en la toma de decisiones para la gestión de la infraestructura vial tomando en cuenta factores socio-económicos, ambientales y del estado de las estructuras.
- Para el análisis de priorización no se toman en cuenta los recursos ni el presupuesto necesario para dar mantenimiento a las distintas obras geotécnicas, esta herramienta es solamente aplicable en procesos de planeamiento por lo que tampoco elimina la necesidad de estudios detallados para cada una de las patologías que se puedan presentar.
- Para poder aplicar el MPOG se requiere de la inspección visual de la zona de estudio, esto con el fin de poder completar la información necesaria requerida por el mismo.
- Para realizar la inspección es necesario la utilización de GPS que ayude a georeferenciar la estructura o el talud levantado por lo que el inspector debe estar debidamente calificado para hacer la misma.
- Para que el modelo sea veraz, tal como lo recomienda (Araya, 2012), se debe actualizar el modelo de manera constante y periódica, esto tendrá efectos positivos en la planificación quinquenal y en los planes operativos institucionales del CONAVI.
- El modelo no considera la importancia de la ruta, ya que esto debe ser considerado en un modelo de priorización de inversiones para la superficie de ruedo. Esto siguiendo la filosofía de que es necesaria la evaluación de cada uno de los componentes que conforman la infraestructura vial individualmente.
- Para la aplicación del modelo es necesario tener conocimientos de las herramientas de sistemas de información geográfica y geografía.

# Conclusiones

1. Se generó el modelo de priorización de obras geotécnicas y se construyó con base en los sistemas de información geográfica (SIG). Este modelo permite la gestión a nivel de red de los aspectos que influyen en la priorización de obras geotécnicas por lo que el mismo ayuda a tomar las decisiones correctas y pertinentes en los periodos adecuados, de manera que, se minimice el recurso invertido en obras geotécnicas y así se pueda aprovechar en otros componentes de la infraestructura vial.  
En general el modelo determina que:
  - o Los aspectos más importantes son los ambientales, estos permiten conocer a priori que zonas inspeccionar y dan una idea general del grado de problemática geotécnica de la zona
  - o Los aspectos socio-económicos tienen una importancia baja para zonas rurales por lo que el modelo estaría regido por los aspectos los aspectos ambientales y técnicos.
  - o Si el modelo de priorización determina que las estructuras tienen un orden de priorización igual, se procede a decidir el orden de priorización respecto al desarrollo del territorio, donde se prioriza la zona que tenga un índice de mayor priorización.
2. La aplicación del modelo al cantón de Oreamuno de Cartago determinó que:
  - a. La zona tiene una importancia moderada (alrededor del 94%), por lo que este componente de las carreteras podría no tener tanta importancia como otros componentes (la superficie de ruedo, señalización, obras de drenaje, etc.).
  - b. En la ruta nacional 219 se deben atender 2 problemas geotécnicos, el primero relacionado con un deslizamiento rotacional ubicado en las coordenadas (511404,1093050) y el otro es un problema de erosión ubicado en un talud conformado ubicado en las coordenadas (511708,1092950).
  - c. El cantón de Oreamuno de Cartago presenta no presenta problemas geotécnicos donde solamente sectores puntuales de la ruta 219 y en la zona norte del cantón pueden presentar susceptibilidad a problemas alta (alrededor del 5%).
3. Para la zona de Oreamuno de Cartago el orden de priorización geotécnica viene dado por el cuadro 21 de la página 86.
4. Para el modelo de priorización geotécnica los elementos críticos a tomar en cuenta, en orden de importancia son:
  - a. Estructuras geológicas
  - b. Precipitación
  - c. Topografía
  - d. Tipo de suelo (geotecnia)
  - e. Inspección visual
  - f. Cobertura del suelo
  - g. Cercanía con los asentamientos humanos
  - h. Desarrollo del territorio
  - i. Sismicidad
5. Debido a la necesidad del proyecto de realizar la inspección visual de las obras geotécnicas existentes se desarrollaron los formularios de las figuras 45 y 46. Estos son el insumo de la información de campo necesaria para poder aplicar el modelo al cantón de Oremuno de Cartago.
6. Para realizar futuras actualizaciones del modelo es preciso:

- a. Evaluar el modelo en distintas zonas de país de manera que se pueda observar el comportamiento del mismo y así determinar si es necesaria calibración.
  - b. Que las instituciones de las cuales se extrajo la información mantengan sus bases de datos actualizadas de manera que se trabaje con la información más precisa al momento de generar un nuevo modelo
7. La utilización de Los métodos de evaluación multicriterio tales como el método CRITIC y método de la Entropía permiten considerar las desviaciones estándar de los criterios de manera que se tomen en cuenta las variaciones de interpretación por parte de los profesionales consultados.

# Recomendaciones

1. Se debe inventariar las obras de infraestructura geotécnica, de tal manera que las mismas sean fácilmente identificables y así se puedan establecer programas de trabajo de forma certera. Para ello se insta a utilizar los formularios de las figuras 45 y 46 y al montaje de la información en Sistemas de Información Geográfica de manera que la información esté debidamente procesada para su utilización y consulta.
2. El inventariado de obras geotécnicas no debe ser a nivel local, se insta para que la institución haga un inventariado de las obras geotécnicas a nivel nacional. Esto podría servir para futuras actualizaciones de este modelo (considerando inventario de obras geotécnicas) y que esto colabore a tomar decisiones a nivel de red.
3. Es necesario que las instituciones públicas tales como INEC, MOPT, MIDEPLAN, CNE, IGN, IMN, mantengan sus bases de datos actualizadas y se insta a que hayan convenios de cooperación entre las mismas de manera que la información pueda ser utilizada por ellas y también se insta a que se todas las instituciones utilicen los Sistemas de información Geográfica (SIG) para sus bases de datos de manera que los formatos de la información se unifiquen y así se faciliten futuros modelos, no solamente ingenieriles sino también sociales, económicos, de desarrollo, etc.
4. Se insta al desarrollo de modelos de priorización de los demás componentes del corredor vial que de esta manera haya un conocimiento total de cada uno de los componentes, para así, poder establecer un programa de trabajo que englobe todas y cada una de las partes del corredor vial.
5. Se recomienda que se efectúen inspecciones visuales trimestrales de manera que el modelo de priorización geotécnica se actualice periódicamente respecto a las patologías o daños que puedan aparecer en este periodo de tiempo y así se puedan intervenir en el momento preciso las estructuras.
6. Este modelo que fue aplicado al cantón de Oreamuno de Cartago, dicho modelo puede aplicarse a las demás zonas del país de manera que se genere una gran base de datos que permita tomar decisiones de intervención a corto, mediano y largo plazo.
7. Se recomienda aplicar el modelo para toda una zona de manera que el ingeniero encargado tenga una visión completa de su zona y se puedan tomar decisiones de manera que se distribuyan los recursos adecuadamente.
8. Se recomienda evaluar este modelo en alguna zona donde se conozca que hayan grandes problemas geotécnicos como es el caso de la ruta 27 para futuras calibraciones y debidos ajustes que se puedan implementar.
9. El modelo de priorización de obras geotécnicas puede ser empleado no solo para carreteras nacionales, sino también para carreteras municipales por lo que se insta a la comunicación y al dialogo entre el CONAVI, el MOPT y las municipalidades de manera que el proyecto sirva también para la planificación municipal.
10. Se recomienda utilizar escalas de mapa donde los datos no tengan pixeles de más de 400 metros cuadrados (20x20m), esto produce que no se puedan trabajar con escalas grandes, sin embargo es una escala adecuada ya que sino el análisis de la información sería muy somero y no denotaría zonas de priorización mayor. Es por ello que si se deben analizar grandes extensiones de carretera se recomienda

- hacer varios modelos por zonas para luego compararlos unos con otros.
11. En zonas donde hayan susceptibilidades de deslizamientos altas se recomienda que un equipo de expertos realicen un reconocimiento de campo para verificar que no hayan zonas de amenaza potencial para la carretera que no hayan sido valoradas por el modelo elaborado.
  12. Se recomienda instrumentar zonas donde el modelo determine zonas de priorización alta y no existan patologías o estructuras construidas y que de esta manera se puedan tomar medidas en tiempos adecuados de tiempo y que de esta manera se minimicen las inversiones requeridas.

# Bibliografía

- ACG. (2010). Boletín informativo de la asociación de la Asociación Costarricense de Geotecnia No. 12. 2-3.
- Araya, E. (2012). *Mejor y Calibración mediante la inspección del modelo de priorización de obras de infraestructuras de drenaje (MPOID)*. Cartago: Proyecto de graduación para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería en Construcción.
- Arias, S. (2010). Recomendación Hidrológico-Hidráulica para controlar el agua de escorrentía sobre tramos críticos de la carretera del cantón de Oreamuno. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica: Proyecto final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción. .
- Ayuga, E. (2008). S.I.G. Definiciones Básicas.
- Aznar, J., & Guijarro, F. (2012). Nuevos Métodos de valoración: Modelos multicriterio. Universitat Politècnica de València.
- Barquero, E. (1998). Conservación de caminos: Un modelo participativo Proyecto MOPT/GTZ. Costa Rica: Sociedad Alemana de Cooperación Técnica GTZ.
- Barrantes, G., Barrantes, O., & Nuñez, O. (2011). *Efectividad de la Metodología Mora-Vahrson Modificada en el Caso de los Deslizamientos Provocados por el Terremoto de Cinchona, Costa Rica*. Revista Geográfica de América Central N° 47.
- Barrantes, G., Barrantes, O., & Nuñez, O. (2011). Efectividad de la Metodología Mora-Vahrson Modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Cinchona, Costa Rica. Revista Geográfica de América Central. N°47 II Semestre 2011 pp.141-162.
- Barredo, J., & Bosque, J. (1999). Multicriteria evaluation methods for ordinal data in a GIS environment. En *Geographical Systems*, N°5 (págs. 313-327).
- Bogantes, R. (Julio de 1999). Propuesta de Zonificación Geotécnica para el Área Metropolitana. *Informe de Trabajo de Graduación para Obtener el Grado de Licenciado en Ingeniería Civil*. San José, Costa Rica.
- Bogantes, R., Laporte, G., Quesada, C., & Vásquez, A. (s.f.). Zonificación Geotécnica General de Costa Rica, considerando elementos edáficos y climáticos.
- Bolaños, M. (1994). Necesidad de un Código de Cimentaciones en Costa Rica. *Revista del Colegio*.
- CCCR. (2009). Código de cimentaciones de Costa Rica. Editorial Tecnológica de CR, 2a edición.
- Chakhar, S. (2003). Enhancing Geographical Systems Capabilities with Multi-Criteria Evaluation Functions. En *Journal of Geographic Information and Decision Analysis 2003*, Vol. 7, No. 2 (págs. 47-71).
- Chaverri, J. (2006). Notas de curso de pavimentos. *Escuela de Ingeniería Civil*. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

- CNE. (s.f.). Amenazas Naturales que Afectan Costa Rica.
- Consejo Nacional de Vialidad. (2011). *Resumen de imprevisibilidades*.
- Consejo Nacional de Vialidad, C. (2010). *Red Piramide de Costa Rica*.
- Coral, H. (2006). *Geotecnia I*. Facultad de Ingeniería, Universidad de Nariño.
- Crespo, C. (2005). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Editorial Limusa.
- Dahlhaus Parkman, E. (2002). *Gestión del Mantenimiento de Carreteras y Tecnología para el Mantenimiento de Pavimentos*. Seminario sobre HDM-4, MOPT.
- Dirección de Vialidad. (Noviembre de 2010). *Proyectos de Conservación Periódica de Caminos Pavimentados en Chile*. Chile.
- Escobar, G. (2006). *Propuesta de un Modelo de gestión para el Mantenimiento de Carreteras del Estado Lara-Venezuela*. Tesis doctoral. Universidad de Granada: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Civil.
- Estrada, J. (2002). Asignación de Pesos no Subjetivos, para la Valuación. *Tesis para obtener el título de Maestro en Valuación Inmobiliaria e Industrial*. Delegación Distrito Federal: Instituto Tecnológico de la Construcción.
- F., E., & Ruiz, L. (1979). *Precipitaciones máximas en España*. Madrid: ICONA.
- Fallas, A. (2010). *Intervenciones Basadas en la Planificación y Gestión de los Riesgos del Agua y del Medio Ambiente con Enfoque de Multiculturalidad y Género en el Municipio de Oreamuno, Cartago, Costa Rica*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Fallas, J. (2011). *Sistemas de información geográfica, Que es un SIG?* Costa Rica: Universidad Nacional, Escuela de Ciencias Ambientales.
- Flintsch, G., & Medina, A. (Agosto de 2010). *Sistema de Gestión de infraestructura*. San José, Costa Rica.
- García, M. (1996). *Manuel de estabilidad de taludes*. Instituto Nacional de Vías.
- García, M. (1996). *Manuel de estabilidad de taludes*. Colombia: Instituto Nacional de Vías.
- Gonzales De Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Instituto Geográfico Nacional. *El sistema de referencia CR05 y la proyección transversal de mercator para Costa Rica CRTM05*. San José: Unidad ejecutora del programa de regulación del registro y catastro.
- Janbú, N. (1996). *Slope stability evaluations in engineering practice*. Proceedings of the Seventh International Symposium on landslides: Trondheim.
- LANAME. (2007). *Metodología simplificada para evaluación de vulnerabilidad geotécnica de terraplenes en carreteras de montaña de Costa Rica*. Infraestructura Vial, Vol 19 (#18), 4-14.
- Levin, R., & Rubin, D. (2004). *Estadística para administración y economía*. México: Pearson Educación.
- Ley 5060. *Ley General de Caminos Públicos*. La Asamblea Legislativa de la Republica de Costa Rica.
- Martínez, E., & Escudey, M. (1997). *Evaluación y decisión: reflexiones y experiencia*. Santiago, USACH: UNESCO 1997.
- Mass, S., & Valdez, M. E. (2003). *Principios básicos de cartografía y cartografía automatizada*. UAEM.

- MIDEPLAN. (2007). *Índice de Desarrollo Social*. San José: MIDEPLAN.
- MINAE. (Febrero de 2006). Manual de instrumentos técnicos para el proceso de evaluación de impacto ambiental (Manual EIA). San José: Decreto 32967.
- MOPT. (2011). Sistemas de Gestión de Carreteras. Unidad de Gestión de Carreteras, Dirección de Planificación Sectorial.
- Mora, R. (2004). *Evaluación de la Susceptibilidad al Deslizamiento del Cantón de San José, Provincia de San José, Costa Rica*. Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- Mora, R., Chaves, J., & Vázquez, M. (2002). *Zonificación de la Susceptibilidad al Deslizamiento: Resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación del método Mora-Vahrson*. Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas, FUNDEVI 0960-00, Vicerrectoría de Investigación 1133-A0827, escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.
- Mora, R., Vahrson, W., & Mora, S. (1992). *Macrozonificación de la amenaza de deslizamientos y resultados obtenidos en el área del valle central de Costa Rica*. CEPREDENAC, San José de Costa Rica.
- Morgenstem, N. (1997). "Toward landslide risk assessment in practice" *Proceedings of the International Workshop on landslide risk assessment*. Honolulu, Hawaii, USA.
- Murillo, M., & Romero, L. (s.f.). Elaboración de mapas de amenazas y recursos. San José: Comisión Nacional de Emergencias, Dirección de Planes y Operaciones.
- Olivera, F. (1996). Estructuración de vías terrestres. Mexico: Compañía Editorial Continental S.A. (CECSA). Segunda Edición.
- Olivera, F. (1999). *Estructuración de Vías Terrestres*. Mexico: Compañía Editorial Continental S.A.
- Orozco, E. (Mayo de 2007). Zonificación Climática de Costa Rica para la Gestión de Infraestructura Vial. *Informe de Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil*. San José, Costa Rica.
- Peña, J. (2006). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio (3a edición)*. Editorial Club Universitario.
- Pietersen, K. (2006). Multiple criteria decision analysis (MCDA): a tool to support sustainable management of groundwater resources in South Africa. In *Water SA* vol. 32 No. 2.
- Ramirez, O. (2010). Amenaza Volcánica. Cartago: Apuntes del curso Geología Aplicada, Ingeniería en Construcción, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Romero, C. (1997). *Economía de los Recursos Ambientales y Naturales*. Alianza Economía.
- RSN. (2005). Red Sismológica Nacional. *Los principales volcanes activos de Costa Rica: Rincón de la Vieja, Arenal, Poás, e Irazú*. San José: Universidad de Costa Rica, Escuela de Geología.
- Sanz, M. (2007). Sistemas de Información Geográfica: Definición y Desarrollo Histórico del SIG.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos*. División de Publicaciones UIS.
- Suárez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Colombia: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Análisis Geotécnico*. Universidad Industrial de Santander, UIS.

Sub-Saharan Africa Transport Policy Program. (2008). *A user Guide to Road Management Tools*. Recuperado el 3 de febrero del 2013, de World Bank: <http://web.worldbank.org>.

Tkach, R., & Simonovic, S. (1997). A new approach to multi-criteria decision making in water resources. En *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, vol. 1 (págs. 25-44).

Toskano, G. (2005). El proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Lima, Perú: Facultad de Ciencias Matemáticas. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

UNESCO. (1976). *Engineering geological maps: a guide to their preparation*. París: UNESCO PRESS.

Universidad Nacional de Colombia. (2006). *Manual de Inspección Visual de Obras de Estabilización*. Bogotá.

van Zuidram, R. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smits Publishers, The Hague. 442 p.p.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report 176: Landslides: Analysis and Control*. Washington D.C.: Transportation and Road Research Board, National Academy of Science.