

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
POST GRADO DE INGENIERIA VIAL**

**MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE
ESTABILIDAD DE UNA VÍA EN ZONA DE MONTAÑA A TRAVÉS DE
SENSORES REMOTOS.**

www.bdigital.ula.ve

Autor: Ing. Ramírez Moreno María Alejandra.

Tutor: Geomorfólogo Msc. Jorge Carrero.

Mérida, Mayo de 2018

c.c Reconocimiento

**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE
ESTABILIDAD DE UNA VÍA EN ZONA DE MONTAÑA A TRAVÉS DE
SENSORES REMOTOS.**

**Tesis presentada como requisito para optar al Grado de Magister Scientiae
en Ingeniería Vial**

Autor: Ing. Ramírez Moreno María Alejandra.

Tutor: Geomorfólogo Msc. Jorge Carrero.

Mérida, Mayo de 2018

c.c Reconocimiento

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso por regalarme vida, salud y entendimiento para enfrentar y tratar de comprender las situaciones de cada día.

A mi familia en especial a mi madre, padre y hermano por siempre apoyarme y dedicarme gran parte de su tiempo. Cada palabra de aliento y gesto de amor contribuyeron al cumplimiento de esta meta. Mamá ni la vida me es suficiente para agradecerle por tanto, este logro está especialmente dedicado a Usted. La amo.

Al profesor Jorge Carrero quien con atención y buena voluntad ha puesto a mi disposición las herramientas y conocimientos necesarios para desarrollar con éxito este importante trabajo.

Al Ing. Víctor Manuel Parra por estar siempre presente brindándome un apoyo incondicional lleno de sinceridad y lealtad.

A mis colegas y compañeros de postgrado Ing. Daniela Guillen, Ing. Engelber Sánchez e Ing. Johannes Briceño por compartir con solidaridad y alegría este bello camino.

A la ilustre Universidad de Los Andes, mi segunda casa, cuyas aulas y personal han hecho de mí la profesional de hoy.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	2
EL PROBLEMA	2
1.1.- Ubicación	2
1.2.- Condiciones Climáticas. Datos hidrometeorológicos.	3
1.2.2.- Precipitaciones medias anuales de Estaciones Meteorológicas próximas a la zona de estudio	4
1.3.- Planteamiento del Problema	6
1.4.- Formulación del problema	7
1.5.- Objetivos de la Investigación	7
1.5.1.- Objetivo General	7

1.5.2.- Objetivos Específicos.....	7
1.6.- Justificación de la Investigación	8
1.7.- Alcances	8
CAPÍTULO II.....	9
MARCO TEÓRICO	9
2.1.- Antecedentes históricos	9
2.2.- Antecedentes de la Investigación.....	9
2.3.- Bases Teóricas	12
2.3.1.- Espectro Electromagnético	13
2.3.1.1.- Radiación Electromagnética.....	13
2.3.1.2.- Resolución de un sistema sensor.....	14
2.3.2.- Clasificación de los sistemas sensores.....	15
En función de la fuente de energía:	16
2.3.2.1.- Sensores pasivos:	16
2.3.2.2.- Sensores Activos.	18
2.3.3.- Sistemas de información geográfica (SIG).....	19
2.3.3.1.- Visores cartográficos.....	19
2.3.4.- Tratamiento Digital de Imágenes.....	20
2.3.4.1.- Corrección de imágenes satelitales	21
2.3.4.2.- Interpretación de Imágenes	24
2.3.5.- Fotografías aéreas.	24
2.3.5.1.- Fotointerpretación	25
2.3.6.- Geomorfología	25

2.3.7.- Estabilidad vial.....	26
2.3.8.- Clasificación de parámetros de evaluación de estabilidad:.....	26
Tipos de vegetación.	26
Clasificación de la Pendiente.....	27
CAPÍTULO III.....	29
MARCO METODOLÓGICO	29
3.1.- Nivel de Investigación	29
3.2.- Diseño de la investigación	30
3.3.- Población y Muestra	30
3.3.1.- Población.....	30
3.3.2.- Muestra.....	31
3.4.- Conformación de la base de datos geoespacial.....	31
3.4.1.- Adquisición de las fotografías aéreas e imágenes satelitales	31
3.4.2.- Procesamiento digital de las imágenes satelitales.....	32
3.4.2.1.- Corrección de imágenes	32
3.5.2.2.- Ortorrectificación de imágenes	32
3.5.2.3.- Aplicación del proceso de fusión de las imágenes.....	32
3.5.3.- Interpretación de las imágenes satelitales y fotografías aéreas. Comparaciones.	33
3.5.3.1.- Criterios.....	33
3.5.4.- Metodologías aplicadas al análisis de los parámetros de evaluación de estabilidad vial.....	34
CAPÍTULO IV.	36

MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD DE UNA VÍA EN ZONA DE MONTAÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS.36

4.1.- Generalidades de la metodología de evaluación. 36

- A. Georreferenciación de las imágenes satelitales y fotografías aéreas: 36
- B. Selección de la escala de trabajo..... 37
- C. Determinación del área de estudio..... 37
- D. Subdivisión del eje de la vía. 37
- E. Parámetros de evaluación. 37

4.2.- Esquema de la metodología de evaluación de las condiciones de estabilidad de una vía en zona de montaña a través de la utilización de sensores remotos. 38

- 4.2.1 Soporte teórico del procedimiento a seguir en la metodología de evaluación..... 46

4.3.- Guía para el procesamiento de los parámetros de evaluación. 58

- E.1.- Drenaje..... 58
- E.2.- Pendiente..... 59
- E.3.- Litología..... 60
- E.4.- Estructuras Geológicas. 61
- E.5.- Procesos geomorfológicos degradacionales y unidades geomorfológicas. 62
- E.6.- Vegetación. 64
- E.7.- Precipitación. 65

4.4.- Definición de los grados de inestabilidad. 65

- 4.4.1.- Categorías..... 73

4.5.- Ejemplo de aplicación del método de evaluación de las condiciones de estabilidad de una vía en zona de montaña a través de sensores remotos. Carretera La Victoria – El Vigía. Mérida Estado Mérida.	75
A- Georreferenciación de las imágenes satelitales y fotografías aéreas.	75
A.1.- Adquisición de las fotografías aéreas e imágenes satelitales	76
B.- Selección de la escala de trabajo.	78
C.- Determinación del área de estudio.	78
D.- Subdivisión del eje de la vía.	78
E.- Parámetros de evaluación.	79
E.1.- Drenaje.....	79
E.2.- Pendiente.....	79
E.3.- Litología.....	80
E.4.- Estructuras Geológicas	82
E.5.- Procesos geomorfológicos degradacionales y unidades geomorfológicas agradacionales.	82
E.6.- Vegetación.	83
E.7.- Precipitación.	83
F.- Definición de los grados de inestabilidad.....	84
G.- Correlación de los factores de interpretación.....	84
Progresivas 0+000 – 3+000	84
Progresivas 3+000 – 6+000	97
Progresivas 6+000 – 9+000	101
Progresivas 9+000 – 12+000	104
Progresivas 12+000 – 15+500	109

Progresivas 15+500 – 18+000.....	111
Progresivas 18+000 – 21+000.....	115
Progresivas 21+000 – 24+000.....	117
Progresiva 24+000 – 26+420.....	120
CONCLUSIONES.....	124
RECOMENDACIONES	128
Progresivas 0+000 – 3+000.....	128
Progresivas 3+000 – 6+000.....	128
Progresivas 6+000 – 9+000.....	129
Progresivas 9+000 – 12+000.....	129
Progresivas 12+000 – 15+500.....	130
Progresivas 15+500 – 18+000.....	130
Progresivas 18+000 – 21+000.....	130
Progresivas 21+000 – 26+420.....	131
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132
GLOSARIO	135
ANEXOS. CD-ROM.....	141

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos de precipitaciones medias anuales.	4
Tabla 2. Datos requeridos para la generación de Isojetas.	5
Tabla 3. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación drenaje.	66
Tabla 4. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación pendiente.	67
Tabla 5. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación litología.....	68
Tabla 6. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación estructuras geológicas.....	69
Tabla 7. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación procesos geomorfológicos.	70
Tabla 8. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación unidades geomorfológicas.	71
Tabla 9. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación vegetación.....	72
Tabla 10. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación precipitación.	72
Tabla 11. Categoría - Factor de daño	73
Tabla 12. Grados de inestabilidad.....	74
Tabla 13. Determinación del porcentaje de daño, parámetro drenaje. Tramo 0+000 - 3+000.....	86
Tabla 14. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro drenaje. Tramo 0+000 - 3+000.	87

Tabla 15. Determinación del porcentaje de daño, parámetro pendiente. Tramo 0+000 - 3+000.....	87
Tabla 16. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro pendiente. Tramo 0+000 - 3+000.	88
Tabla 17. Determinación del porcentaje de daño, parámetro litología. Tramo 0+000 - 3+000.....	89
Tabla 18. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro litología. Tramo 0+000 - 3+000.	89
Tabla 19. Determinación del porcentaje de daño, parámetro estructuras geológicas. Tramo 0+000 - 3+000.....	90
Tabla 20. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro estructuras geológicas. Tramo 0+000 - 3+000.	91
Tabla 21. Determinación del porcentaje de daño, parámetro procesos geomorfológicos. Tramo 0+000 - 3+000.....	92
Tabla 22. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro procesos geomorfológicos. Tramo 0+000 - 3+000.....	92
Tabla 23. Determinación del porcentaje de daño, parámetro unidades geomorfológicas. Tramo 0+000 - 3+000.....	93
Tabla 24. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro unidades geomorfológicas. Tramo 0+000 - 3+000.....	94
Tabla 25. Determinación del porcentaje de daño, parámetro vegetación. Tramo 0+000 - 3+000.....	94
Tabla 26. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro vegetación. Tramo 0+000 - 3+000.	95
Tabla 27. Determinación del porcentaje de daño, parámetro precipitación. Tramo 0+000 - 3+000.	95

Tabla 28. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro precipitación. Tramo 0+000 - 3+000.....	96
Tabla 29. Promedio de la puntuación de los parámetros evaluados.	96
Tabla 30.Tabla resumen. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 0+000 – 3+000.....	97
Tabla 31. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 3+000 – 6+000 ...	100
Tabla 32. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 6+000 – 9+000 ...	104
Tabla 33. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 9+000 – 12+000 .	108
Tabla.34 Correlación de factores de interpretación. Progresivas 12+000 – 15+000	111
Tabla 35. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 15+000 – 18+000	114
Tabla 36. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 18+000 – 21+000	116
Tabla 37. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 21+000 – 24+000	119
Tabla 38. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 24+000 – 26+420	122

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación geográfica de Venezuela. (The Texas University of Austin, 2017)	2
Figura 2. Ubicación geográfica de Mérida. (Venezuela Tuya, 2017).....	3
Figura 3. Espectro Electromagnético (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004).....	13
Figura 4. Sensores según la fuente de energía. (Cano & A, 2014).....	16
Figura 5. Imagen satélite Landsat.....	17
Figura 6. Imagen satélite Spot.....	18
Figura 7. Imagen satélite Miranda.	18
Figura 8. Fotografías aéreas de la zona de estudio.....	25
Figura 9. Procedimiento para fusión de imágenes.	33
Figura 10. Esquema. Método de Evaluación. Georreferenciación, escala de trabajo, área de estudio, subdivisión del eje.	38
Figura 11. Esquema. Método de Evaluación. Definición de los parámetros de evaluación drenaje, pendiente y litología.	39
Figura 12. Esquema. Método de Evaluación.	40
Figura 13. Esquema. Método de Evaluación.	41
Figura 14. Esquema. Método de Evaluación.	42
Figura 15. Esquema. Método de Evaluación.	43

Figura 16. Grados de inestabilidad.	44
Figura 17. Determinación de los grados de inestabilidad.	45
Figura 19. Paso A.	46
Figura 20. Paso B.	47
Figura 21. Paso C.	48
Figura 22. Paso D.	49
Figura 23. Paso E.1.	50
Figura 24. Paso E.2.	51
Figura 25. Paso E.3	52
Figura 26. Paso E.4	53
Figura 27. Paso E.5.	54
Figura 28. Paso E.5	55
Figura 29. Paso E.6.	56
Figura 30. Paso E.7	57
Figura 30. Paso F	74
Figura 32. Ubicación Relativa. Local 002 del Estado Mérida. La Victoria – El Vigía.	75
Figura 33. Reclasificación de las pendientes de las laderas de la zona de estudio.	79
Figura 34 Formaciones Geológicas del área de estudio.	81
Figura 35. Vegetación del área de estudio.	83
Figura 36. Rangos de precipitación media anual dela zona en estudio.	84
Figura 37. Progresiva 0+440. Puente sobre torrente.	85
Figura 38. Progresiva 1+950. Falla de borde interno de la curva. Ausencia de cunetas o canales.	85

Figura 39. Progresiva 4+400. Afectación de la estructura de pavimento. Presencia de humedad.	98
Figura 40. Progresiva 4+650. Grieta en pantalla de muro armado.	98
Figura 41. Progresiva 3+075. Formación Tostosa. Medición de ángulos de Rumbo y Buzamiento. R= N22°W; B=32°	99
Figura 42. Progresiva 6+450. Falla de borde.	101
Figura 43. Progresiva 9+000 Falla de borde. Deformación de calzada.	101
Figura 44. Progresiva 6+450. Afloramiento sobre el que se midieron los ángulos de rumbo y buzamiento de la foliación. R= S11°W; B=40°	103
Figura 45. Progresiva 8+800. Afloramiento sobre el que se midieron los ángulos de rumbo y buzamiento de la foliación. R= S65°W; B=20°	103
Figura 46. Progresiva 10+460. Quebrada La Granzonera. Aporte de detritos. Colmatación de torrenteras.	105
Figura 47. Progresiva 10+460. Quebrada La Granzonera. Interrupción del 60% de la calzada por material fino aportado por la misma.	105
Figura 48 Progresiva 10+460. Medición de ángulos de Rumbo y buzamiento. R= S14°E; B=25°	107
Figura 49 Progresiva 11+900. Medición de ángulos de Rumbo y buzamiento. Anticlinal	107
Figura 50. Progresiva 14+300. Formación Palmar. Planos de estratificación. Ángulos de Rumbo y Buzamiento: R= S30°E; B=16°	110
Figura 51. Progresiva 16+220. Condiciones de la boca de salida de alcantarilla	112
Figura 52. Progresiva 15+750. Rocas sedimentarias donde se visualizan los planos de estratificación. Ángulos de Rumbo y Buzamiento: R= S19°E; B=12°	113
Figura 53. Progresiva 16+250. Falla de borde, por desplazamiento de terreno.	114
Figura 54. Progresiva 23+090. Cauce estacionario.	117

Figura 55. Progresiva 23+090. Muro armado para contención de detritos.....	117
Figura 56. Progresiva 23+780 material sedimentario desprendido interrumpiendo la calzada.	118
Figura 57 Progresiva 2++240. Puente tipo guerra, ancho 3.75 metros, largo 28.00metros	120
Figura 58. Progresiva 26+420. Final de la vía a estudiar.....	123
Figura 59. Progresiva 26+420. Obra de drenaje (cuneta) operativa.	123

www.bdigital.ula.ve



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
POST GRADO DE INGENIERIA VIAL

MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD DE UNA VÍA EN ZONA DE MONTAÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS.

Autor: Ing. Ramírez Moreno María Alejandra.
Tutor: Geomorfólogo Msc. Jorge Carrero.

RESUMEN

A lo largo de la historia la humanidad ha experimentado la necesidad de explorar la superficie terrestre en todas sus dimensiones y obtener una perspectiva espacial de la misma, llevando esto al desarrollo de diversas técnicas como la teledetección que ha permitido adquirir información a distancia sin contacto físico con objetos. En el presente trabajo se conjuga la aplicación de diversos avances tecnológicos para optimizar tiempo y esfuerzo en la determinación y solución de los problemas que atañen a las condiciones físicas de la vialidad considerando las características del medio físico donde se emplaza.

La investigación se enfoca en el desarrollo de una metodología de evaluación que determina las condiciones de estabilidad de una carretera de montaña a través de la utilización de sensores remotos, específicamente imágenes satelitales y fotografías aéreas, como herramienta de análisis para estudiar el entorno a escala regional y local. Se interrelacionan los aspectos geomorfológicos, geológicos, topográficos, de vegetación e hídricos con las obras viales, estableciéndose los siguientes parámetros de interpretación: drenaje, pendiente, litología, estructuras geológicas, procesos y unidades geomorfológicas, vegetación y precipitación. A partir de la correlación de los mismos se definen las zonas con un alto, medio y bajo grado de inestabilidad. De esta manera se minimiza el tiempo invertido en estudios de vías terrestres, aplicando las medidas de mantenimiento acordes.

Para el procesamiento y análisis visual de las fotografías aéreas se estableció la metodología basada en la estereoscopia; mientras que para un tratamiento digital de la información se empleó el software ArcGIS. Estas metodologías de análisis fueron correlacionadas con la información de campo recopilada y se establecieron las diferencias y similitudes técnicas al evaluar el eje vial con ambos sistemas de detección. Se tomó como referencia de estudio para la aplicación de la metodología la carretera Local 002 del estado Mérida, en vista que la misma presenta serios problemas de funcionamiento referidos a los parámetros antes mencionados.

Descriptores: fotointerpretación, estabilidad, correlación.

INTRODUCCIÓN

El deseo del ser humano de tener una perspectiva aérea de la tierra lo llevó al desarrollo de la teledetección, la cual apareció por primera vez en la Literatura Científica en 1960 y significó obtener información sin contacto físico con objetos. Los procedimientos de percepción remota constituyen técnicas no invasivas y útiles para el estudio de áreas extensas, de difícil acceso, permitiendo planear el trabajo desde las diversas etapas de la exploración y en este caso, del mantenimiento de una vía ya existente. En el área de la ingeniería civil se conjuga la aplicación de diversos avances tecnológicos para optimizar tiempo y esfuerzo en la determinación y solución de problemas.

Haciendo uso de diversas fuentes de información documental y de campo, aplicando una metodología enmarcada en un enfoque cuantitativo, se desarrolla como objetivo central de la investigación el método de evaluación de las condiciones de estabilidad de la vialidad a través de la utilización de sensores remotos, específicamente imágenes satelitales y fotografías aéreas. Se establece como ejemplo de aplicación la carretera La Victoria - El Vigía que está emplazada en una superficie cuya litología y características geomorfológicas definen la permanente aparición de problemas de estabilidad.

La investigación representa un trabajo innovador en el que se lleva a cabo la recolección de información tratada analógica y digitalmente. Los especialistas viales poco han considerado la aplicación de esta tecnología, como herramienta de análisis para abordar los problemas físicos que presentan las vías desde un punto de vista macroscópico, contribuyendo a minimizar de esta manera los largos lapsos de tiempo hasta el momento invertidos en estudios de corredores viales, que en la mayoría de los casos, por la extensión del área a ser intervenida, genera retraso en la solución de problemas.

EL PROBLEMA

Como ejemplo de aplicación de la metodología de evaluación se seleccionó la Local 002 del Estado Mérida, Venezuela. Carretera representativa de zona de montaña.

1.1.- Ubicación

La República Bolivariana de Venezuela, es un Estado de América del Sur que limita al Norte con el mar Caribe; al Este con Guyana; al Sur con Brasil y Colombia y al Oeste con Colombia. (Espasa Calpe, S. A., 1998). Dicha ubicación se presenta en la figura 1.



Figura 1. Ubicación geográfica de Venezuela. (The Texas University of Austin, 2017)

El Estado Mérida se ubica en Los Andes Venezolanos, en la zona occidental del país. Limita al Norte con los estados Zulia y Trujillo, al Sur con Táchira y Barinas, al Este con Trujillo y Barinas y al Oeste con Táchira y Zulia.

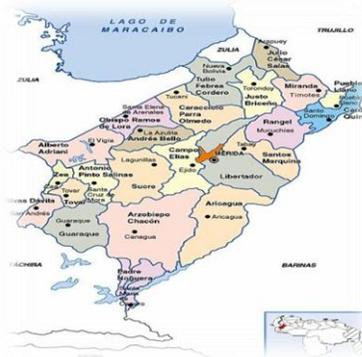


Figura 2. Ubicación geográfica de Mérida. (Venezuela Tuya, 2017)

La Local 002 del Estado Mérida, comunica la ciudad de Mérida con el resto del país. Inicia en la hacienda La Victoria ubicada, en el puente del Río Mocotíes a una altitud de 516 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas UTM Norte 932.104,122 Este 213.366,95 y finaliza con la conexión a la carretera Rafael Caldera a una altitud de 143 metros sobre el nivel del mar, con coordenadas UTM Norte 950.655,272 y Este 211.596,626. Los anexos 1-A y 1-B presentan la ubicación de la vía en función al área de estudio.

1.2.- Condiciones Climáticas. Datos hidrometeorológicos.

A continuación se presenta el registro de precipitaciones medias anuales de las estaciones meteorológicas próximas a la zona de estudio, del ejemplo de aplicación, utilizada en la generación del mapa de isoyetas como paso a ejecutar en la metodología desarrollada. En la Tabla 1 se determina el promedio de precipitaciones para 30 años de registro. El tiempo de registro debe oscilar entre 20 y 30 años con el fin que los datos sean lo más representativos posible, ajustados a la realidad de la zona.

1.2.2.- Precipitaciones medias anuales de Estaciones Meteorológicas próximas a la zona de estudio

Tabla 1. Datos de precipitaciones medias anuales.

ESTACION 1: EL VIGIA		ESTACION 2: MESA BOLIVAR		ESTACION 3: SANTA CRUZ		ESTACION 4: TOVAR		ESTACION 5: LA PALMITA		ESTACION 6: CHIGUARÁ		ESTACION 7: ZEA		ESTACION 8: LA CUCHILLA	
AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)	AÑO	P (mm)
1970	1904,4	1970	1105,9	1949		1970	1296,3	1970	1312,3	1970	833,2	1969	1822,4	1970	1783,3
1971	2242,8	1971	900,7	1950		1971	1001,7	1971	1740,4	1971	1306,3	1970		1971	1669,9
1972	2018,5	1972	1209	1951		1972	1231,3	1972	1347,5	1972	842,8	1971	1211,3	1972	1566,4
1973	1702,4	1973	1540,2	1952		1973	1622	1973	1082,1	1973	696,7	1972	1737,3	1973	1559,2
1974	1705,7	1974	1646,9	1953		1974	1306,9	1974	1350	1974	1072,6	1973	1242,4	1974	1725,5
1975	1917,1	1975	493,7	1954	1370,1	1975	1379,3	1975	872,9	1975		1974	1622,8	1975	1831,9
1976	1478,8	1976	1371,2	1955	1166,7	1976	987,1	1976	1129,8	1976	1142,7	1975	1235,5	1976	1282,3
1977	1387,8	1977	676,9	1956	937,9	1977	762,3	1977	989,3	1977	603,5	1976	838,9	1977	1196,3
1978	1962,4	1978	614,1	1957		1978	1292,2	1978	1165,5	1978	767,9	1977	1324,5	1978	1481,2
1979	2359,4	1979	1080,2	1958		1979	1255,7	1979	1659,1	1979	1130,3	1978	1612,5	1979	1536,8
1980	1284	1980	543,2	1959		1980	928,3	1980	979,4	1980	588	1979	986,7	1980	1231,5
1981	2069,8	1981		1960		1981	1230,6	1981	1556,6	1981	892,2	1980	1508,8	1981	1937,5
1982	1886,7	1982	794,1	1961	871,1	1982	726,7	1982	1249,7	1982	871,4	1981		1982	1610,1
1983	1660,5	1983	736,3	1962		1983	878,1	1983	943,4	1983	679,6	1982	1036,6	1983	1353,5
1984		1984	954,2	1963	1036,2	1984	1062,9	1984		1984	747,9	1983	1265,6	1984	1453,3
1985	1358,1	1985	1273,1	1964	920,1	1985	1058,2	1985	1516,7	1985	1130,1	1984	1279,9	1985	1453,2
1986	1799,2	1986		1965	712,4	1986	1086,8	1986		1986	1087,6	1985	1385,1	1986	1233,1
1987	1567,3	1987	588	1966	1228,6	1987	713,8	1987		1987	534,4	1986	1062,6	1987	896,1
1988	2100,2	1988		1967	920,7	1988	1062,4	1988		1988	867,8	1987	1233,1	1988	1764,5
1989	2035,2	1989	944,9	1968	1084,6	1989	1095,3	1989		1989	728,2	1988	1354,6	1989	1143,6
1990	2277,2	1990	775,5	1969	1131	1990	958,9	1990	1046,8	1990	690,9	1989	1072,6	1990	1471,4
1991	1980,2	1991	770,8	1970	1099,1	1991	900,8	1991	1231,3	1991	510	1990	881,6	1991	1234,2
1992	1466,9	1992	532,2	1971	1173,3	1992	549,8	1992	967,6	1992	423,7	1991	640,3	1992	1075,7
1993	1541,5	1993	806	1972		1993	913,1	1993		1993	467,5	1992		1993	1228
1994	1863,2	1994		1973		1994		1994		1994		1993	397,4	1994	
1995	2071,1	1995	814,2	1974		1995		1995	1244,8	1995		1994	572	1995	1390,7
1996		1996		1975		1996		1996		1996		1995		1996	
1997	1330,8	1997	567,6	1976		1997		1997		1997	297,8	1996		1997	832,7
1998		1998		1977		1998		1998		1998		1997		1998	
1999		1999		1978		1999		1999		1999		1998		1999	
2000		2000		1979		2000		2000	1602,5	2000		1999		2000	
Prec. Prom	1806,6		901,7		1047,8		1054,2		1249,4		788,0		1102,0		1420,8

Fuente: (inameh, 2017)

Cada estación meteorológica cuyo registro de precipitación posee influencia en la zona de estudio, debe ser identificada y georreferenciada, como base de datos para la construcción de las isoyetas a través del sistema de información geográfica. En la Tabla 2 se presentan las coordenadas UTM y el promedio de precipitación anual de cada una de las estaciones próximas a la vía seleccionada como ejemplo de aplicación del método.

Tabla 2. Datos requeridos para la generación de Isoyetas.

ESTACIÓN METEOROLÓGICA	ESTE	NORTE	P (mm)
EL VIGÍA	210554,186	952453,582	1806,6
MESA BOLÍVAR	215414,61	938125,848	901,7
SANTA CRUZ	209143,15	929498,719	1047,8
TOVAR	197710,101	923120,866	1054,2
LA PALMITA	213117,763	946994,764	1249,4
CHIGUARA	216506,779	941284,891	788,0
ZEA	194011,901	928435,001	1102,0
LA CUCHILLA	241071,71	955113,3	1420,8

Fuente: (inameh, 2017)

1.3.- Planteamiento del Problema

Los especialistas viales a nivel mundial poco han considerado la aplicación de las tecnologías derivadas de la teledetección, específicamente la suministrada por satélites en el trazado de vías, así como en la elaboración de programas de mantenimiento y rehabilitación vial, como herramienta para abordar los problemas físicos. Es necesario por ello conjugar ambas disciplinas, interrelacionando factores de análisis con la ubicación de vías, optimizando de esta manera el tiempo empleado en la solución de problemas o implementación de técnicas.

Un elevado porcentaje de los problemas presentes en la red vial nacional, como son, deslizamientos de taludes, fallas de borde, deformaciones de la calzada, problemas de movimiento de masas, entre otros, son confrontados en la mayoría de los casos de forma puntual, sin considerar, la influencia de elementos regionales de tipo geomorfológico, geológico, hídrico o antrópicos que los generan. Lo que genera la solución parcial del problema, y en la mayoría de los casos la reinversión de recursos.

La visual del ingeniero no alcanza un enfoque regional para determinar las causas de los procesos activos; situación esta que puede ser abordada estableciendo una metodología cuyo punto de partida sea la comparación de información suministrada por sensores remotos que permitan el análisis de ejes viales en diversas escalas según la procedencia de la imagen o fotografía aérea en estudio. Con el fin de innovar se proporciona entonces una nueva herramienta de trabajo que minimice los fracasos en el proceso de recolección y análisis de información.

Lo antes expuesto permite plantear a modo de reflexión las siguientes interrogantes:

¿Se hace necesario desarrollar una metodología de evaluación de las condiciones de estabilidad de la vialidad a través de sensores remotos?.

Una vez recopilada la información en imágenes satelitales y de fotografías aéreas ¿es posible establecer patrones de comparación entre los sistemas empleados?.

¿Con la información obtenida a través de sensores remotos se puede determinar el grado y tipo de estabilidad de un corredor vial?.

1.4.- Formulación del problema

Diagnosticar a través de los sensores remotos las condiciones de estabilidad de una vía, analizando regionalmente los procesos que ahí se generan que por las condiciones de accesibilidad o extensión no pueden ser totalmente determinados en el terreno.

1.5.- Objetivos de la Investigación

1.5.1.- Objetivo General

Desarrollar una metodología de evaluación de las condiciones de estabilidad de una carretera en zona de montaña, a través de sensores remotos, tomando como ejemplo La Victoria - El Vigía,

1.5.2.- Objetivos Específicos

- ✓ Establecer factores de interpretación satelital en carretera de montaña con fines de rehabilitación y mantenimiento.
- ✓ Establecer diferencias y similitudes técnicas al evaluar el eje vial con diferentes sistemas de detección, como los son las fotografías aéreas y las imágenes satelitales, pudiendo trabajar con ellas a diferentes escalas.
- ✓ Identificar y localizar los problemas inherentes a los diversos grados de estabilidad de un corredor vial a través de información suministrada por los sensores remotos y verificados en campo.

1.6.- Justificación de la Investigación

Viene dada por la necesidad de lograr un mayor aprovechamiento de los recursos tecnológicos espaciales en el área de la ingeniería civil, específicamente en el ámbito de mantenimiento vial. Donde se requiere un método práctico y eficaz para determinar las condiciones de estabilidad de una vía existente. Se traduce en la explotación de recursos provenientes de los sensores remotos que permiten la aplicación de conocimientos teóricos-prácticos hasta los momentos validados.

El desarrollo de la investigación se hace técnicamente justificable y necesario, ya que desde diversos ámbitos la utilización de información arrojada por sensores remotos adquiere gran importancia, resultando ampliamente aplicable en el estudio del medio ambiente en general.

1.7.- Alcances

Establecer una conexión entre los sensores remotos y las vías de comunicación terrestre, permitiéndose la interacción de la información que de los mismos se pueden obtener para determinar la estabilidad de la vía; conjugando el análisis de información teórica-técnica con los hallazgos de campo.

MARCO TEÓRICO

2.1.- Antecedentes históricos

- El 21 de noviembre de 1783 el marqués d 'Arlandes y Pilatre de Rosier viajaron media hora en su globo Montgolfier cerca de París convirtiéndose en los primeros aeronautas. (Verstappen, 1977).
- El fotógrafo parisino F.F. Tournachon, en 1858 logró hacer las primeras fotografías aéreas de una pequeña aldea de Petit Bicetre.
- Las fotografías de hiper-altitud estuvieron disponibles desde 1946, en el marco de los programas espaciales de los Estados Unidos. (Verstappen, 1977).
- La fotointerpretación comenzó en la primera Guerra Mundial cuando el Jefe de las Fuerzas Expedicionarias de EE. UU., estudió fotografías aéreas del Noreste de Francia. (Verstappen, 1977).
- El primer satélite puesto en órbita fue lanzado por la unión soviética el 24 de Octubre de 1957.

2.2.- Antecedentes de la Investigación.

Con el fin de establecer una reseña en cuanto a los precedentes relacionados con el tema abordado, es importante destacar que la aplicación de información suministrada por sensores remotos, en el análisis de las condiciones de estabilidad de las vías, ya sean redes viales urbanas o rurales, es muy limitada desde el punto de vista investigativo y práctico. Los especialistas en vías y en sensores remotos hasta la fecha no han conjugado en gran parte dichas disciplinas para acometer los temas derivados.

Se hizo necesario por tal motivo, el abordaje de trabajos afines realizados a nivel mundial, para dar a conocer los múltiples aportes de la tecnología de sensores remotos en el área de la ingeniería civil.

Según Ruiz & Guarnizo (2014), en Aplicación para la reducción de accidentalidad en carreteras del Grupo de Optoelectrónica y Tecnología Láser – Universidad Carlos III de Madrid; presentan la tendencia actual de utilizar sensores embarcados. Estos realizan una medida remota de las condiciones de la calzada y de otros parámetros, como herramienta imprescindible para tomar decisiones en las actividades de mantenimiento de la vialidad durante el invierno.

Dicho trabajo mantiene cierta relación con la investigación realizada en lo que a la utilización de sensores remotos se refiere, ya que el fin último es lograr determinar las condiciones físicas de la vialidad a través de sensores remotos para establecer los mecanismos de rehabilitación y mantenimiento apropiados. Sin embargo la investigación de tecnologías ópticas para detección de las condiciones de la calzada se limita a la información arrojada por sensores ubicados en algún dispositivo móvil, que detectan temperaturas, humedad del aire, espesor de capas de nieve; no generando así una visión de las diversas variables que rigen el comportamiento y la estabilidad de un tramo de vía.

Bueno (2012), de la Universidad Politécnica de Valencia presenta la creación de unos dispositivos capaces de medir varias magnitudes físicas durante la evaluación de un elemento de obra civil, como variaciones de deformación, temperatura y pH en puentes, túneles o diques para monitorizar la salud estructural de las mismas. Es importante mencionar que este tipo de investigación representaría una herramienta de gran utilidad al conjugarse con una metodología de evaluación de estabilidad a escala local, porque permitiría monitorizar los parámetros claves al momento de aplicar tratamientos preventivos y correctivos a un corredor vial.

Por su parte Moreno, Alonso, Gomariz, & Alonso, (2010), presentan un análisis comparativo entre Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados mediante diferentes métodos de interpolación y uno obtenido mediante tecnología LIDAR y

asumiendo este último como verdad-terreno, se establece cuál de los modelos interpolados representa con mayor fidelidad la superficie terrestre. Cabe destacar que el modelado de cualquier superficie es de fundamental importancia en estudios topográficos, hídricos, climatológicos, entre otros; evidenciándose de esta manera la importancia de la aplicación de sensores remotos como base para abordar problemas del medio ambiental.

La metodología desarrollada establece como parámetro de evaluación la pendiente, la cual se obtiene a partir de un modelo de elevación, que permite la visualización y representación de la superficie en estudio en una perspectiva tridimensional. Se considera por esta razón que el antecedente representa un aporte favorable para la determinación de la estabilidad en vías existentes.

Según lo publicado por Weixing, Nan, Yi, & Fengping (2016), la tecnología de extracción de carreteras a partir de una imagen ha sido tema de investigación en los últimos años. Después de analizar diferentes características y modelos de carreteras, los métodos de extracción de carreteras se clasificaron en los basados en el conocimiento, la morfología matemática, modelo de contorno y programación dinámica. Finalmente, se concluye que sólo el uso de un tipo de características de la carretera permite obtener una extracción poco buena. Por lo tanto, para obtener buenos resultados, la extracción de carreteras debe combinar varios métodos de acuerdo a las aplicaciones reales.

Al respecto Shiferaw, Tarun, & P, (2014), establecen la Aplicación de la teledetección y el SIG para la gestión de desastres de desprendimiento de tierras. La garganta de Abay, en Etiopía ha sido testigo de frecuentes deslizamientos durante la estación de lluvias. La estabilidad natural de las laderas ha sido perturbada debido a la construcción de carreteras, las frágiles condiciones geológicas, aguas subterráneas y la escorrentía superficial incontrolada que favorecen el deslizamiento en temporada de lluvias. Esta condición de deslizamiento de tierra ha dado lugar a interrupciones frecuentes en el movimiento del tráfico, siendo manifestaciones comunes de la

inestabilidad de la zona. A través del estudio, se delimitaron las zonas propensas al deslizamiento de tierra.

Estableciendo puntos de comparación con los aportes que ofrece ésta publicación, se concluye que con la utilización de las técnicas SIG, se elaboró un mapa de zonificación de estabilidad en función de la utilización de parámetros de evaluación presentes en el área de estudio. En combinación con el modelo de elevación proporcionado por la (Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico (FIIIDT), 2017) se obtiene un análisis local y regional de la vía.

Así mismos, Rajadurai (2015), en su trabajo persiguen identificar y mapear el sitio de construcción de carreteras adecuado utilizando el Sistema de Detección Remota y Sistema de Información Geográfica. Los sistemas de información geográfica (SIG) pueden modelar fácilmente tales variables, incluyendo la topografía de las áreas edificadas y la geología. Esta investigación corrobora la importancia que poseen los sistemas de información geográfica en el análisis de vías existentes y en el estudio de alternativas de rutas, optimizando tiempo y recursos; razón por la cual dicha investigación es tomada en cuenta.

2.3.- Bases Teóricas

Según Arozarena (1989) la teledetección es el sistema integral de captura de información territorial (a partir de la radiación electromagnética captada por el sensor) tanto temática (medio ambiental), como de información topográfica (MDT, planimetría). Ello ha sido posible gracias al desarrollo que han experimentado, por un lado, las técnicas de tratamiento digital de imágenes, lo cual ha facilitado, en todos los procesos, la obtención de datos significativos del territorio y por otro al acceso a la exhaustiva información digital proporcionada por sensores, en su aspecto espacial, radiométrico, espectral y temporal.

2.3.1.- Espectro Electromagnético

Según Gutierrez (2005). Todo sistema de detección cuyo resultado sea una fotografía o una imagen se basa en el registro de las longitudes de onda reflejadas o emitidas por los cuerpos y su transformación en una imagen visible. La ordenación de las ondas electromagnéticas, según su frecuencia o longitud de onda, recibe el nombre de Espectro Electromagnético. Existen espectros visibles e invisibles, ondas sonoras; que permiten visualizar los objetos a través de equipos o del ojo. Es el principio básico en el cual se fundamenta la teoría de imagen satelital.

Según (Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico (FIIIDT), 2017) La firma espectral es la respuesta espectral propia de cada objeto en cuanto a energía reflejada o emitida; las características de la firma espectral dependen de la estructura atómica y molecular, características de superficie y temperatura, del tipo de material. En general los rasgos espectrales característicos de un material se manifiestan como bandas de absorción. A continuación se representa de forma gráfica el espectro electromagnético.

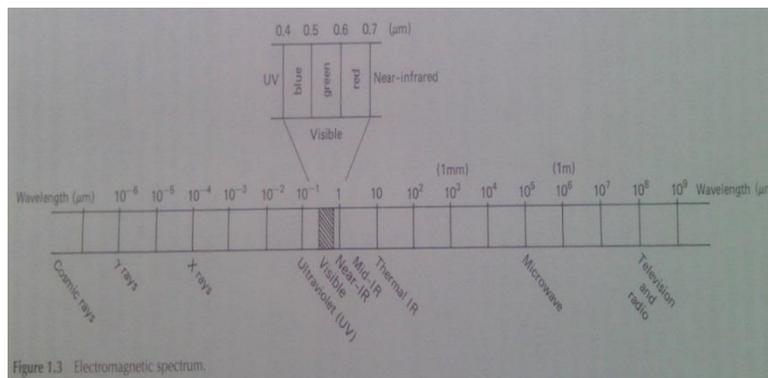


Figura 3. Espectro Electromagnético (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004).

2.3.1.1.- Radiación Electromagnética

Cualquier energía se estudia a través de la radiación y se define en función de su longitud de onda o frecuencia. Define que las cargas eléctricas en movimiento producen campos eléctricos y magnéticos; los cambios cíclicos en estos campos

producen radiación electromagnética. La radiación electromagnética transporta energía de un punto a otro, esta radiación se mueve a la velocidad de la luz. Si las ondas electromagnéticas se organizan de acuerdo a sus longitudes se obtiene el espectro electromagnético. Por ejemplo: Rayos Gamma, rayos ultravioleta, ondas de radio entre otras (Carvajal, 2002).

Un sensor remoto es aquel dispositivo que permite registrar a distancia la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre. (Gutierrez, 2005)

2.3.1.2.- Resolución de un sistema sensor

Chuvieco (1990) de acuerdo con Estes y Simonett en 1975 define que es la habilidad que tiene el sensor para registrar, discriminando la información de detalle. “un sensor debe muestrear y discretizar la información de radiación”. La resolución se define por el número de píxeles que integran un sensor de satélite o de cámara digital. A mayor número de píxeles por unidad de superficie, mayor resolución del fotosensor, pero también mayor es el volumen del archivo informático generado.

Una imagen de satélite se caracteriza por las siguientes modalidades de resolución:

a. Resolución Espacial:

Se designa al objeto más pequeño capaz de ser reconocido sobre la imagen. Se refiere al tamaño del campo de visión instantánea. Tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen llamada Pixel, que ofrece el nivel de detalle, medido en metros sobre el terreno, esto depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneo y las características ópticas del sensor. Por ejemplo las imágenes Landsat TM, tienen una resolución espacial de 30x30. El sensor SPOT - HRV tiene una resolución de 10x10m, mientras que los satélites meteorológicos como NOAA, el píxel representa un tamaño desde 500 a 1100m de lado. (Chuvieco, 1990) de acuerdo con Estes y Simonett en 1975.

b. Resolución Espectral:

Indica el número y ancho de las bandas espectrales que puede captar el sensor. Cuanto mayor número de bandas proporcione facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas terrestre. Por ejemplo SPOT tiene una resolución espectral de 3, Landsat de 7. Los nuevos sensores, llamados también espectrómetros o hiperespectrales llegan a tener hasta 256 canales con un ancho de banda muy estrecho para poder separar de forma precisa distintos objetos por su comportamiento espectral. (Chuvieco, 1990) de acuerdo con Estes y Simonett en 1975.

c. Resolución Radiométrica:

Se define el número de posibles niveles digitales (ND) en cada banda. Se expresa mediante el número de bits que se requieren para almacenar cada pixel. También llamada resolución dinámica, y se refiere a la cantidad de niveles de gris en que se divide la radiación recibida para ser almacenada y procesada posteriormente. Así por ejemplo Landsat MSS tiene una resolución espectral de $2^6 = 64$ niveles de gris en el canal 6, y Landsat MSS en las bandas 4 a 7 de $2^7 = 128$ niveles de gris, mientras que en Landsat TM es de $2^8 = 256$. Esto significa que se tiene una mejor resolución dinámica en el TM y se puede distinguir mejor las pequeñas diferencias de radiación. (Chuvieco, 1990) de acuerdo con Estes y Simonett en 1975.

d. Resolución Temporal:

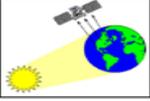
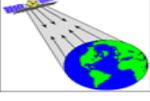
Determina la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad e inclinación). A partir del Landsat 4 en 1984 el ciclo de repetición se redujo a 15 días. SPOT permite un ciclo de repetición entre 3 y 26 días. (Chuvieco, 1990) de acuerdo con Estes y Simonett en 1975.

2.3.2.- Clasificación de los sistemas sensores

Según Cano & A, (2014), está determinada en función de la fuente de energía o del tipo de producto que genera.

En función de la fuente de energía:

La teledetección se logra detectando y grabando la energía. Por reflexión de la energía solar, siendo una teledetección pasiva, o por reflexión de un haz de energía artificial denominada teledetección activa.

Tipos de Sensores según su fuente de energía	Principios	Sensores disponibles
Pasivos (ópticos)	<p>Son aquellos que reciben la energía reflejada o emitida por la Tierra cuando es iluminada por el Sol.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Landsat: MSS, TM, ETM • SPOT: 1,2,3,4, Vegetation, 5 • IRS-C,D, P-6 • IKONOS • C-BERS 1, 2 • SAC-C • MODIS • ASTER • MISR • Quick Bird (Orbimage) • NOAA-AVHRR • Sea-WIFS (Orbimage) • GOES • Hyperion • ADEOS II • ENVISAT (MERIS)
Activos (radar)	<p>Son aquellos que producen su propia energía para "iluminar" el objeto.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • ERS 1,2 • RADARSAT • JERS-1 • SRTM • ENVISAT (ASAR)

www.bdigital.ula.ve
 Figura 4. Sensores según la fuente de energía. (Cano & A, 2014)

2.3.2.1.- Sensores pasivos:

- **Satélite**

Un satélite en órbita se mueve en una trayectoria elíptica alrededor de un planeta respecto a los focos de la elipse. Los elementos de la órbita incluyen su altitud, período, inclinación y tiempo de cruce ecuatorial. Para la mayoría de los satélites de observación de la Tierra, la órbita es aproximadamente circular, con altitudes superiores a los 400 km sobre la superficie terrestre. (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004).

Partes del satélite:

Plataforma: contiene todo el equipo para el funcionamiento del satélite.

Panel solar: suministra su energía.

Equipos de carga útil: antenas, sensores, transmisores, entre otros.

A continuación se explican algunos de los sistemas satelitales más usados en la interpretación de imágenes. (Cano & A, 2014).

Sistemas satelitales

Sistema **Landsat**: son una serie de satélites construidos y puestos en órbita por EE. UU. para la observación en alta resolución de la superficie terrestre. (Cano & A, 2014). El primer satélite artificial se lanzó en 1972 ERTS-1 renombrado por la NASA en 1975 Landsat, utiliza la técnica de registro multiespectral, es decir, registra varias imágenes en bandas separadas del espectro visible e infrarrojo. Para la fecha el último puesto en órbita es Landsat 8.

A continuación se presenta la imagen satelital del sistema Landsat de la zona de estudio seleccionada para el ejemplo de aplicación del metodo. Suministrada por (Fundación Instituto de Ingenieria para Investigación y Desarrollo Tecnológico (FIIIDT), 2017).



Figura 5. Imagen satélite Landsat.

Sistema **SPOT** (Système de Observation de la Terre): desarrollado por el Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia. En 1986 se lanzó SPOT 1, 1990 SPOT 2, 1993 SPOT 3, 1998 SPOT 4 y en el año 2002 SPOT 5. Posee opción multispectral y multitemporal. Para imágenes obtenidas en modo pancromático pueden observarse elementos de tamaño de 10 m y en imágenes de modo multiespectral se observan aquellos de más de 20 m. SPOT tiene una opción de cobertura estereoscópica, con la posibilidad de hacer mapas topográficos, mediciones de pendiente, con tamaños de escena de captura de 3600 km². (Cano & A, 2014).

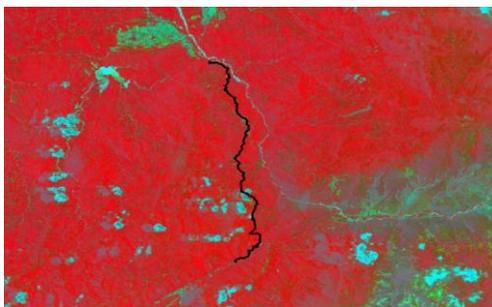


Figura 6. Imagen satélite Spot.

Satélite **Miranda (VRSS-1)**: Es un Satélite de Observación Remota, destinado a tomar fotografías digitales en alta resolución del territorio de la República Bolivariana de Venezuela. La carga útil de este proyecto está compuesta por cámaras de alta resolución (PMC), así como por cámaras de barrido ancho (WMC), utiliza la plataforma CAST-2000, diseñada para satélites de bajo peso. El Miranda puede realizar mapas cartográficos, así como también evaluación de los suelos, cosechas, producción, recursos hídricos y desertificación. (Cano & A, 2014).

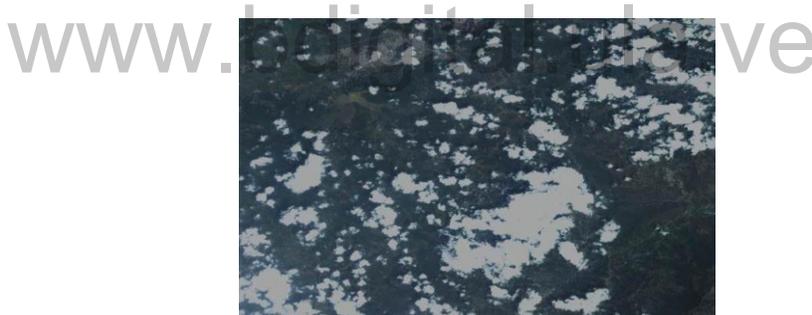


Figura 7. Imagen satélite Miranda.

2.3.2.2.- Sensores Activos.

- **Radar**

Es un sensor remoto donde la energía electromagnética (transportadora de la información) es aportada por el mismo sistema, opera en la región de las microondas del espectro electromagnético.

El sistema a través de la antena envía hacia el terreno ondas radiales con propiedades conocidas; las longitudes de onda λ van de 0.86 a 25 cm emitidas en

forma de impulsos de corta duración viajan hasta chocar con la escena iluminada y son reflejados especular o difusamente. El sistema opera bajo cualquier condición atmosférica. (Cano & A, 2014).

Según Gutierrez (2005) Existen dos tipos de radar, el Radar de Apertura Real (RAR) y el Radar de Apertura Sintética (SAR). En el primero, utilizado a bordo de un avión la resolución de las imágenes depende de la longitud real de la antena acoplada lateralmente a la nave. En el segundo, la longitud de la antena es menor que en el RAR o SLAR, lo que se compensa proyectando un haz de microondas más ancho, que la antena va barriendo por tramos al desplazarse con el vuelo, sintetizando una antena mayor.

2.3.3.- Sistemas de información geográfica (SIG)

Representa el sistema de información diseñado para trabajar con datos georreferenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas (Star & Estes, 1990). Aplican procedimientos para facilitar la gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y visualización de datos. (Onsrud; Harlan, J; Steven, 1992) Existen numerosos SIG entre los que destacan: ArcGis, Autodesk Map, Caris, QGIS, Map Server, entre otros.

2.3.3.1.- Visores cartográficos.

Programas diseñados para acceder on line a servidores de cartografía. La diferencia básica entre los visores web y un SIG radica en que los primeros están dedicados a mostrar información cartográfica visual y no están enfocados a la producción de cartografía digital para exportarlos a otros documentos. El uso de los visores es frecuente, ya que están diseñados de forma sencilla, sin necesidad de tener conocimientos previos de cartografía para su manejo, como requiere el manejo de los SIG. (Avada, 2012).

Las funciones básicas del visor incorporan, únicamente, la posibilidad de búsqueda de toponimia, seleccionar imágenes por momento temporal o realizar filtros basados en geología, nubosidad, índices de humedad, vegetación, urbanismo entre

otras posibilidades. Los visores para teledetección más relevantes basados en descarga y análisis de imágenes son Land Viewer, World Viewer, Landsat Explorer, Sentinel 2 Couddless, Google Earth, Sas Plane, (Avada, 2012).

SAS Planet es un visor de origen ruso con interfaz en inglés, de libre descarga que permite la captura de imágenes satelitales de alta resolución ya georreferenciadas a diferencia de otros visores, todas las imágenes o mapas descargados permanecen en el PC donde se descargan y pueden verse incluso sin conexión a internet. Además de los mapas satelitales, puede trabajar con mapas combinados de paisajes, políticos, así como un mapa de la Luna y Marte. (SAS Group, 2007-2015).

2.3.4.- Tratamiento Digital de Imágenes

Según Arozarena (1989), el tratamiento digital de imágenes es una parte fundamental de la teledetección, cuyo desarrollo ha impulsado las aplicaciones de los datos digitales procedentes de sensores. La imagen en forma digital (matriz numérica bidimensional) obtenida directamente o por transformación de la imagen analógica; será la fuente de entrada de datos en el sistema de tratamiento. La codificación (N° bits por muestra) permite discretizar, almacenar y transmitir. Es el proceso de cuantificación el que convierte una señal de entrada en otra de salida según una ecuación dada.

La imagen como matriz discretizada en niveles de grises ND (valor radiométrico o digital) posee una expresión por celda (pixel)

Cada Pixel \rightarrow Valor de la radiación electromagnética reflejada (Q)

$$ND = f(\text{energía radiante recibida} - Q) = i(x,y) \cdot r(x,y)$$

$$i(x,y) = f(\text{iluminación}) \quad 0 < i < \infty$$

$$r(x,y) = f(\text{reflectancia del objeto}) \quad 0 < r < 1$$

Con 8 bits / pixel en cada uno de los tres colores aditivos (RVA) sería representado 256 ND (Niveles de grises) por pixel y 16 millones de colores

$$ND = 2^n \quad n = N^\circ \text{ bits (Profundidad del pixel, es el valor).}$$

El hombre observa hasta 200ND que en escala de grises sería tener una profundidad de 8 bits/s

Los tratamientos digitales de imágenes son operaciones matemáticas sobre los valores de la matriz bidimensional. Se establecen los niveles de procesamiento 1A y 2A de acuerdo a la corrección recibida por la imagen, desde el sensor o a través de un software. Una imagen de satélite está sometida a una serie de interferencias que hacen que la información aparezca perturbada por errores, entre los que se destacan:

- Fallos en los sensores, generan píxeles incorrectos (corrección radiométrica).
- Alteraciones en el movimiento del satélite y el mecanismo de captación de los sensores, generan distorsiones en la imagen global (corrección geométrica)
- Interferencia de la atmósfera, alteran de forma sistemática los valores de los píxeles (corrección atmosférica). (Arozarena, 1989).

De acuerdo al origen de la imagen, sensor y forma de captura, la misma amerita una corrección o tratamiento. Razón por la cual se presentan a continuación los tipos de corrección de imágenes satelitales.

2.3.4.1.- Corrección de imágenes satelitales

A. Correcciones Radiométricas:

Afectan la radiometría de la imagen, implica por una parte la restauración de líneas o píxeles perdidos y por otra la corrección del bandeo de la imagen; en algunos casos las estaciones receptoras llevan a cabo algún tipo de corrección en el momento de recepción de la imagen.

Idealmente, cualquier superficie capturada en dos diferentes imágenes de satélite (con el mismo sensor) deberían aparecer con los mismos valores de intensidad; en la práctica no es así debido a las variables condiciones atmosféricas y de iluminación, por lo que se hace necesaria la corrección radiométrica de las imágenes; ya sea la corrección radiométrica absoluta utilizando un modelo analítico, o la corrección mediante una transformación de niveles basada en el histograma (corrección

radiométrica relativa). (Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico (FIIIDT), 2017).

B. Correcciones Geométricas o Georreferenciación:

Según Arozarena (1989) este tipo de corrección se debe a las variaciones espaciales en la captura (aleteo, cabeceo, altura, velocidad) y al ajuste a un sistema de referencia.

Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georreferenciada; cada pixel se ubica en un sistema de coordenadas arbitrario de tipo fila-columna como los que manejan los programas de tratamiento digital de imágenes. El Tratamiento Digital de Imágenes modifica la geometría del pixel, a través de la rotación, cambio de escala y la traslación en las tres dimensiones.

El proceso de georreferenciación consiste en dar a cada pixel su localización en un sistema de coordenadas estándar (UTM, Lambert, coordenadas geográficas) para poder, de este modo, combinar la imagen de satélite con otro tipo de capas en un entorno SIG. Tras la georreferenciación se obtiene una nueva capa en la que cada columna corresponde con un valor de longitud y cada fila con un valor de latitud por ejemplo.

Las correcciones necesarias para transformar en cada punto de la imagen sus coordenadas arbitrarias (fila-columna) en coordenadas reales (X e Y UTM por ejemplo) se explicitan mediante un par de ecuaciones que hacen corresponder a cada pixel par (f,c) un par (X,Y).

$$X = f1(f; c)$$

$$Y = f2(f; c)$$

La forma y parámetros de estas funciones dependen fundamentalmente del tipo de enfoque que se escoja para realizar la georreferenciación. Existen fundamentalmente dos métodos.

El primero, la corrección orbital, que modela las fuentes de error y su influencia. Para ello es necesario conocer con precisión tanto las características de la órbita del satélite como las del sensor. El segundo es un enfoque empírico que modela la distribución de errores en la imagen utilizando puntos de control.

El primero es más automático conociendo la información necesaria y las ecuaciones de transformación, aunque falla cuando aparecen errores aleatorios; es el que se suele suministrar cuando los datos se piden georreferenciados. El segundo es más simple en cuanto a su formulación y corrige mejor los errores aleatorios, basado en un procedimiento de regresión.

C. Corrección Geométrica con Modelos Digitales de Elevaciones

Uno de los principales elementos que introducen errores en la georreferenciación son los cambios bruscos de altitud dentro de una imagen. Generalmente puede disponerse de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), es decir, una capa raster que contiene en cada celdilla su valor de altitud. (Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico (FIIIDT), 2017).

Puede incorporarse este MDE al proceso de georreferenciación empleando las ecuaciones de transformación:

$$X = a_0 + a_1c + a_2f + a_3Z + a_4Zc + a_5Zf$$

$$Y = b_0 + b_1c + b_2f + b_3Z + b_4Zc + b_5Zf$$

D. Corrección atmosférica

Se trata de evaluar y eliminar las distorsiones que la atmósfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la superficie terrestre. Por tanto se va a basar en modelos físicos más complejos que los modelos estadísticos utilizados anteriormente. (Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico (FIIIDT), 2017).

El primer paso es convertir los Niveles Digitales (ND) almacenados por el sensor en valores de radiancia.

2.3.4.2.- Interpretación de Imágenes

Las imágenes espaciales contienen un registro detallado de las características en el suelo en el momento de la adquisición de datos. Un intérprete examina sistemáticamente esta información y, con frecuencia, otros materiales de apoyo, como mapas e informes de observaciones de campo. Con base en este estudio, se realiza una interpretación en cuanto a la naturaleza física de los objetos y fenómenos que aparecen en las imágenes. (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004).

Las interpretaciones pueden tener lugar en varios niveles de complejidad, desde el simple reconocimiento de los objetos hasta la obtención de información detallada sobre las complejas interacciones entre la superficie de la tierra y las características del subsuelo. El éxito en la interpretación varía con la capacitación y la experiencia del intérprete.

En general, los intérpretes de imágenes conjugan agudos niveles de observación, con la imaginación y la paciencia; siendo importante que el intérprete tenga un conocimiento profundo del fenómeno en estudio y de la región geográfica en estudio. (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004).

2.3.5.- Fotografías aéreas.

Una de las formas más comunes, versátiles y económicas de teledetección es la fotografía aérea. Las ventajas básicas que ofrece sobre la observación en el terreno incluyen: ventajosa posición, capacidad para detener la acción, grabación permanente, ampliación de la sensibilidad espectral, aumento de la resolución espacial y fidelidad geométrica. (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004).

Las fotografías aéreas pancromáticas están tomadas con película pancromática muy rápida, sensible a todas las longitudes de onda del espectro visible (entre 0,4 y 0,7 μ). En las Fotografías a color (Multiespectrales) los datos se adquieren simultáneamente en varias bandas de espectros. Y en las fotografías infrarrojo la asignación de un color a un rango de sensibilidad espectral dado es un parámetro que se puede variar arbitrariamente. (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004).

Las fotografías aéreas utilizadas en el ejemplo de aplicación de la metodología corresponden a la misiones 010380 y 01045, cuyas escalas corresponden a 1:50.000 y 1:10.000 respectivamente. A continuación se presenta un colachs de las mismas.



Figura 8. Fotografías aéreas de la zona de estudio.

2.3.5.1.- Fotointerpretación

Es el proceso por el que se extrae la información contenida en la fotografía aérea. En una primera fase se reconocen y ubican los diferentes elementos que aparecen representados, empleando los conocimientos del área. Además se debe considerar la escala del fotograma y el tamaño de los objetos representados.

Resulta por tanto una técnica instrumental útil en estudios territoriales. Puede hacerse a partir de la dirección de las sombras o de forma más exacta, mediante un mapa topográfico de la zona. La fotointerpretación se hace a simple vista o bien con el apoyo de la visión estereoscópica. El método de trabajo tradicional ha sido el dibujo de los diferentes objetos que aparecen en la fotografía en acetato transparente al mismo que tiempo que se observa el par de fotogramas con estereoscopio. (Geología Venezolana, 2011).

2.3.6.- Geomorfología

Tiene como objetivo el estudio de accidentes geográficos (incluyendo su génesis y desarrollo), beneficiándose enormemente de la tecnología aeroespacial. Esto es particularmente si se trata de una imagen tridimensional adecuada para el estudio estereoscópico. (Verstappen, 1977).

A principios de los años sesenta, se aceleró de manera repentina los procesos de fotointerpretación, apreciándose cada vez más el geomorfismo, un hecho que puede explicarse por el carácter de movilidad de la Segunda Guerra Mundial. (Verstappen, 1977).

2.3.7.- Estabilidad vial

Se refiere a la condición bajo la cual se alcanza el máximo nivel de operatividad de una vía. Tomando en cuenta el medio físico donde ésta se emplaza, así como la interacción de la misma con los factores medio ambientales de la zona. todos los elementos que integran una sección vial se encuentran bien definidos y en óptimas condiciones. A mayor grado de estabilidad mayor accesibilidad y movilidad.

2.3.8.- Clasificación de parámetros de evaluación de estabilidad:

La clasificación de Varnes (1978), es una de las más completas y, por lo tanto, una de las utilizadas, la cual se basa principalmente en la determinación del tipo de movimientos de masa. En su metodología toma como parámetros de evaluación:

- El tipo de suelo.
- La geología, como la forma en como fueron depositados los elementos.
- Las características geomorfológicas.
- Condiciones topográficas.
- Hidrología local.

Tipos de vegetación.

Según Alcaraz (2013), la posibilidad de clasificación y cartografía de la vegetación se fundamenta en lo siguiente:

- La vegetación es un objeto real, tangible, expresado en manchas reconocibles. Es un fenómeno real y puede ser estudiada.
- Las diferencias entre las manchas de vegetación en términos de estructura, textura y de las características ambientales del hábitat en que está

instalada la vegetación, hace posible la conceptualización de la construcción de tipos de vegetación.

- La gran complejidad de la vegetación, con naturalezas tanto discreta como continua, hace la clasificación de la vegetación necesaria.
- Grados de diferencias entre los tipos de vegetación hacen posible construir un sistema jerárquico, que comprende una serie de tipos anidados de vegetación y su agrupación. El sistema jerárquico es otra forma efectiva de ver propiedades emergentes importantes de los principales patrones de distribución de la vegetación.
- La estructura y dinamismo de la vegetación es un resultado de las propiedades de las poblaciones de plantas constituyentes y de sus respuestas a la naturaleza y dinamismo del medio ambiente.
- Las manchas de vegetación se dan en el espacio, por lo tanto pueden ser cartografiadas en modelos espaciales; es decir, la complejidad de la vegetación puede ser recogida en un mapa.

Bajo estos criterios se fundamenta la clasificación de la vegetación del método desarrollado.

Clasificación de la Pendiente.

De acuerdo a los porcentajes de inclinación esta puede ser:

- A nivel, de 0% a 3%. Denudación no apreciable; por su condición transitable y laborable, es objeto de uso agrícola, solamente se dificulta su uso bajo condiciones secas.
- De 3% a 5%. Ligeramente inclinada. Laderas afectadas especialmente por erosión hídrica.
- De 12% a 5%. Fuertemente inclinada. Movimientos en masa de todo tipo, especialmente soliflucción, reptación, erosión en surcos, ocasionalmente deslizamientos.

- De 25% a 50%. Ligeramente escarpada. Procesos denudacionales intensivos de diferentes clases, zonas con reemplazos forestales con evidencias claras de erosión del suelo.
- De 50% a 75%. Moderadamente escarpado. Desprendimiento de rocas, coluviación.
- De 75% a 100%. Fuertemente escarpado. Caída de rocas, por efectos de tectonismo y bioclástia.

www.bdigital.ula.ve

MARCO METODOLÓGICO

El marco metodológico abre el camino al plan o esquema general que incluye el enfoque de estudio a desarrollar por parte del investigador. Al respecto, Arias (2006) señala: “La metodología del proyecto incluye el tipo o tipos de investigación, las técnicas y los instrumentos que serán utilizados para llevar a cabo la indagación. Es el “como” se realizará el estudio para responder al problema planteado” (p. 110).

Aquí se define la metodología sustentada por autores, la modalidad seleccionada; es decir, el proceso mediante el cual se cumple una serie de pasos y situaciones donde se describe tipo y diseño de investigación, descripción de la metodología, población y muestra, técnicas e instrumentos, validez y confiabilidad del instrumento, como el análisis de datos.

3.1.- Nivel de Investigación

La investigación basada en el desarrollo de un método de evaluación de las condiciones de estabilidad de la vialidad de montaña a través de sensores remotos, se enmarcó dentro del paradigma positivista, con un tipo de investigación documental de campo. Enmarcada en un enfoque cuantitativo bajo la modalidad proyecto factible aplicado.

Según Arias (2006) define la documentación experimental como un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales impresas, audiovisuales o electrónicas, siendo el propósito el aporte de nuevos conocimientos.

Según el Manual de Trabajos de Grado de Especialización, Maestría y Tesis Doctorales, de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2014), se maneja el término Proyecto Factible como: la investigación, elaboración y desarrollo de una propuesta de un modelo operativo viable para solucionar problemas, requerimientos o necesidades de organizaciones o grupos sociales. Puede referirse a la formulación de políticas, programas, tecnologías, métodos o procesos (p. 21).

3.2.- Diseño de la investigación

Según Arias (2006) la investigación de campo es aquella que “consiste en la recolección de datos directamente sin manipular o controlar variable alguna”. Cabe destacar que una vez obtenida la información del área a ser analizada, representada por datos suministrados por imágenes satelitales, fotografías aéreas, mapas especializados y observaciones realizadas en campo se procede a la aplicación de metodologías para la interpretación y análisis de los mismos. Dentro de este rango de análisis se contempla la utilización sistemas de información geográfica con equipos digitales y técnicas para visión estereoscópica.

Una vez desarrollada la metodología de evaluación, fundamentada en la definición y correlación de factores de interpretación, se procedió a la aplicación del método, seleccionando como vía de estudio la Local 002 del Estado Mérida. A partir de los resultados obtenidos se generó un mapa de zonificación con los grados de estabilidad arrojados por el procedimiento y se realizaron las recomendaciones técnicas necesarias para la solución de la problemática vial existente en el área de estudio, con el objeto de ser incorporadas en el plan de mantenimiento vial.

3.3.- Población y Muestra

3.3.1.- Población

En la presente investigación comprende las diversas carreteras de montaña que integran el Estado Mérida. Venezuela.

3.3.2.- Muestra

Representada por la Local 002 del Estado Mérida, vía La Victoria – EL Vigía. En el ejemplo de aplicación del método desarrollado.

3.4.- Conformación de la base de datos geoespacial

La investigación se concreta en tres etapas básicas, inicialmente la obtención de información y datos, a través de la utilización de imágenes, mapas y documentos. Seguidamente la recolección de información en sitio, representada por la observación directa de las condiciones de la vialidad, localización de corrientes de agua, visualización de la estabilidad de taludes, evaluación de las condiciones del pavimento, evaluación de obras viales, obras de drenajes, entre otras; para posteriormente procesar y analizar la información obtenida. Se establecen así las comparaciones, alcances y limitaciones provenientes de dicho procesamiento, que permiten la definición de la metodología desarrollada.

3.4.1.- Adquisición de las fotografías aéreas e imágenes satelitales

Con el propósito de desarrollar la metodología de evaluación, se debe tener a la disposición el conjunto de imágenes satelitales y fotografías aéreas de la zona donde se implanta la vía en estudio.

El antiguo Ministerio d Obras Públicas fue el encargado de la realización de las misiones para la captura de fotografías aéreas a nivel nacional con fines de investigación y realización de proyectos entre la década de los años 70 y 90. Y el Centro de Procesamiento Digital de Imágenes maneja a nivel nacional las imágenes satelitales y de radar para ser utilizadas con fines de investigación.

Ambas instituciones son los principales proveedores de este tipo de información a nivel nacional.

3.4.2.- Procesamiento digital de las imágenes satelitales

3.4.2.1.- Corrección de imágenes

Es importante acotar que para la utilización de las imágenes en cualquier procedimiento de reconocimiento del espacio capturado, es necesario el tratamiento de las mismas, es decir, se requiere su corrección por presentar errores sistemáticos y no sistemáticos, dicha corrección aplica de acuerdo al relieve; se establece para ello los dos procedimientos anteriormente explicados, ya sea a través de parámetros orbitales o puntos de control.

El objetivo fundamental de corregir las imágenes multiespectrales, es la eliminación de información redundante (solapamiento) que pueda existir entre las diversas bandas espectrales.

3.5.2.2.- Ortorrectificación de imágenes

Cuando se pierde la perpendicularidad por los relieves accidentados se aplica la ortorrectificación, se utiliza en imágenes con cambios bruscos de pendiente, se logra a través de un modelo de elevación (DEM) empleando la cartografía de la zona. En la ortorrectificación de imágenes pancromáticas y multiespectrales se determinan los errores medios cuadráticos (RMS) de los puntos de control en valor de píxeles que tienen una correspondencia en metros. (Chuvienco, 1990)

3.5.2.3.- Aplicación del proceso de fusión de las imágenes

Una vez obtenida la imagen en su versión pancromática y multiespectral, por ejemplo cuyo origen sea del satélite SPOT como fue el caso empleado, suministrada por el CPDI, se procedió a la fusión de las mismas, con dicho procedimiento se persiguió obtener la resolución espacial de la imagen pancromática con la resolución espectral (bandas) de la imagen multiespectral, siendo necesario utilizar imágenes corregidas.

El procedimiento llevado a cabo para la fusión de las imágenes se realizó en el programa Erdas Imagine, siendo el siguiente:

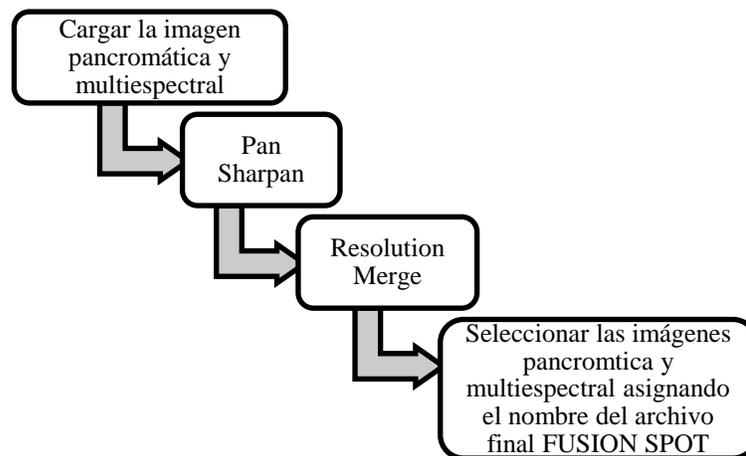


Figura 9. Procedimiento para fusión de imágenes.

En el instituto de Ingeniería, el CPDI, suministró un modelo de elevación de la zona, obtenido de la misión SRTM, a partir del cual se generó un modelo de sombras, empleando para ello el programa ARGIS. Este modelo de sombras es una imagen a escala de grises a la cual se le asignan características específicas como grado de inclinación, acimut, entre otras. En Argis cuando se trabaja con el modelo de sombras se le asigna un porcentaje de transparencia a la imagen como base del relieve en sombra, siguiéndose el mismo principio para el modelo de pendiente.

3.5.3.- Interpretación de las imágenes satelitales y fotografías aéreas. Comparaciones.

3.5.3.1.- Criterios

El procedimiento metodológico a seguir se compone de un conjunto de actividades propias del área. La interpretación requiere abordar diversos aspectos: el soporte material de la fotografía en papel, la escala que depende del objetivo del trabajo y en el caso de la imagen satelital del número de banda o combinación de bandas seleccionadas, el grado de conocimiento y la capacidad interpretativa del profesional encargado de desarrollar el método.

Cabe destacar que una imagen adquirida desde el espacio presenta menos errores que una fotografía aérea por la mayor estabilidad y altura de la plataforma,

presentando de igual manera errores geométricos. Este escenario de posibilidades permite establecer que como técnicas de procesamiento y análisis de datos se empleó la metodología basada en la estereoscopia para el análisis visual de las fotos; mientras que para un tratamiento digital de la imagen se utilizó el software ArcGIS.

A continuación se presentan las diferencias y similitudes técnicas al evaluar el eje vial con diferentes sistemas de detección.

- En lo que respecta a la resolución espacial, ésta se alcanza en mayor proporción en la fotografía aérea a través de la visión estereoscópica; representa así una ventaja sobre la imagen satelital.
- Para escalas de análisis detalladas el rango de acción respecto al área abarcada en la fotografía aérea es más limitado que el de la imagen satelital.
- Tanto en imagen satelitales como en fotografías aéreas se puede realizar un análisis multitemporal.
- Las condiciones estructurales de obras de arte de la vialidad no se pueden analizar con ninguno de los dos sistemas, por la escala detallada que requiere.
- A través de la combinación de bandas de las imágenes satelitales se logra la obtención de información que no puede ser extraída de las fotografías aéreas.
- La georreferenciación de las fotografías aéreas en los sistemas de información geográfica es un procedimiento arduo, con margen de error considerable. Mientras que el de las imágenes satelitales resulta ser práctico.

3.5.4.- Metodologías aplicadas al análisis de los parámetros de evaluación de estabilidad vial.

En función del procedimiento utilizado en la evaluación de parámetros para definir las condiciones de estabilidad de una vía. Cuya representación se hace a través de mapas zonificados. Se distinguen cuatro metodologías: geomorfológica, semi-cuantitativa, determinística y probabilística. Estas se tomaron como referencia para el desarrollo de las categorías o clasificaciones empleadas.

Metodología Geomorfológica: se basa en la determinación de condiciones de inestabilidad de ladera mediante técnicas geomorfológicas y cartográficas. La validez y el detalle del análisis de los mapas resultantes son su principal ventaja, siempre que esté realizado por un buen experto. El grado de subjetividad es muy alto y depende directamente de la experiencia del experto.

Metodología Determinística: se utiliza para el estudio de la estabilidad de una ladera. Estos métodos están basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos. Los datos de entrada son parámetros geotécnicos derivados de ensayos de laboratorio con el fin de calcular el factor de seguridad de la ladera. El grado de fiabilidad de estos métodos es alto en el caso en que los datos utilizados sean los adecuados. Sin embargo, su principal inconveniente es la baja idoneidad para zonificaciones rápidas y áreas extensas (Van Westen, 1993).

Metodología Semi-Cuantitativa: se basa en el conocimiento a priori de los factores que producen la inestabilidad de laderas en una determinada área. Los factores se ordenan y ponderan según el valor asumido o esperado (Carrara et al, 1995). El principal inconveniente consiste en que en la mayoría de los casos, el conocimiento existente entre los factores condicionantes a la inestabilidad es subjetivo, dependiendo directamente de la experiencia del experto. Ejemplos son el método AHP, el índice estadístico, el método de Mora-Varhson y el de Rodríguez, 2001.

Metodología Probabilística o estadística se basa en las relaciones observadas entre cada factor y la distribución del fenómeno en la condición actual y pasada (Carrara et al., 1995). Puede utilizarse cuando se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa, aplicando los modelos estadísticos que pueden ser bivariantes o multivariantes. Estos métodos se caracterizan por su objetividad. La potencia del método estadístico depende directamente de la calidad y cantidad de los datos adquiridos.

MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD DE UNA VÍA EN ZONA DE MONTAÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS.

4.1.- Generalidades de la metodología de evaluación.

Una vez realizada la investigación que permite dar cumplimiento a los objetivos planteados en el presente trabajo, se presenta la metodología básica para la evaluación de las condiciones de estabilidad de una vía en zona de montaña a través de la utilización de sensores remotos. Con el propósito que el ingeniero encargado de dar mantenimiento vial, pueda a través del desarrollo del método definir las zonas con bajo, medio y alto grado de inestabilidad del eje en estudio.

El desarrollo de este método se fundamentó en la integración de diversas disciplinas, como la teledetección, geomorfología, geología, topografía e ingeniería vial, que permitieron el análisis de factores o parámetros de interpretación, a través del procedimiento a continuación descrito, el cual a su vez es presentado esquemáticamente en las figuras 10-a, 10-b y 10-c. Éste debe ser ejecutado paso a paso en la jerarquía descrita:

A. Georreferenciación de las imágenes satelitales y fotografías aéreas:

Se debe considerar la zona horaria correspondiente a la ubicación de la vía, de la proyección UTM del sistema de referencia REGVEN.

B. Selección de la escala de trabajo.

Debe alcanzarse el semi detalle de todos los elementos presentes en la imagen satelital y en la fotografía aérea. Se considera por tal razón la resolución espacial y espectral de las mismas.

C. Determinación del área de estudio.

Por ser áreas características de zona de montaña, deben definirse dos aspectos fisiográficos que inciden directamente en la estabilidad de la carretera; las laderas o vertientes y las divisorias de agua.

D. Subdivisión del eje de la vía.

Por ser 1:10.000 una escala de semi detalle se requiere el sectorizar la vía mediante intervalos de progresivas. Donde las dimensiones longitudinales y transversales exigen un nivel de análisis de los procesos de inestabilidad que puedan ser identificados.

E. Parámetros de evaluación.

A través de la determinación y análisis de capas de trabajo, mediante la utilización del software Argis, se generan factores de correlación que definen las condiciones de estabilidad de la vía. La interacción de estos parámetros permite generar una categoría de los grados de estabilidad.

Estos parámetros están orientados a ser la máxima representación de la zona de estudio en un esquema cuantitativo y/o cualitativo. Los parámetros definidos son: drenaje, pendiente, litología, estructuras geológicas, procesos geomorfológicos degradacionales activos y pasivos, unidades geomorfológicas, vegetación y precipitación.

Se establece a su vez la correlación de los mismos como medida para definir los niveles o grados de estabilidad. Definidos por el nivel de operatividad de los elementos que integran la vía, considerando las amenazas locales y regionales que se

deriven del análisis de los factores evaluados. Dependen del nivel de afectación que posee el tramo en relación a su funcionamiento.

4.2.- Esquema de la metodología de evaluación de las condiciones de estabilidad de una vía en zona de montaña a través de la utilización de sensores remotos.

En las figuras 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 se define el esquema producto de dicha investigación, que tiene como fin determinar las condiciones de estabilidad de una vía en zona de montaña. El esquema a continuación presentado debe ser desarrollado de forma jerárquica siguiendo la secuencia planteada y tomando en cuenta las bases teóricas que lo sustentan.

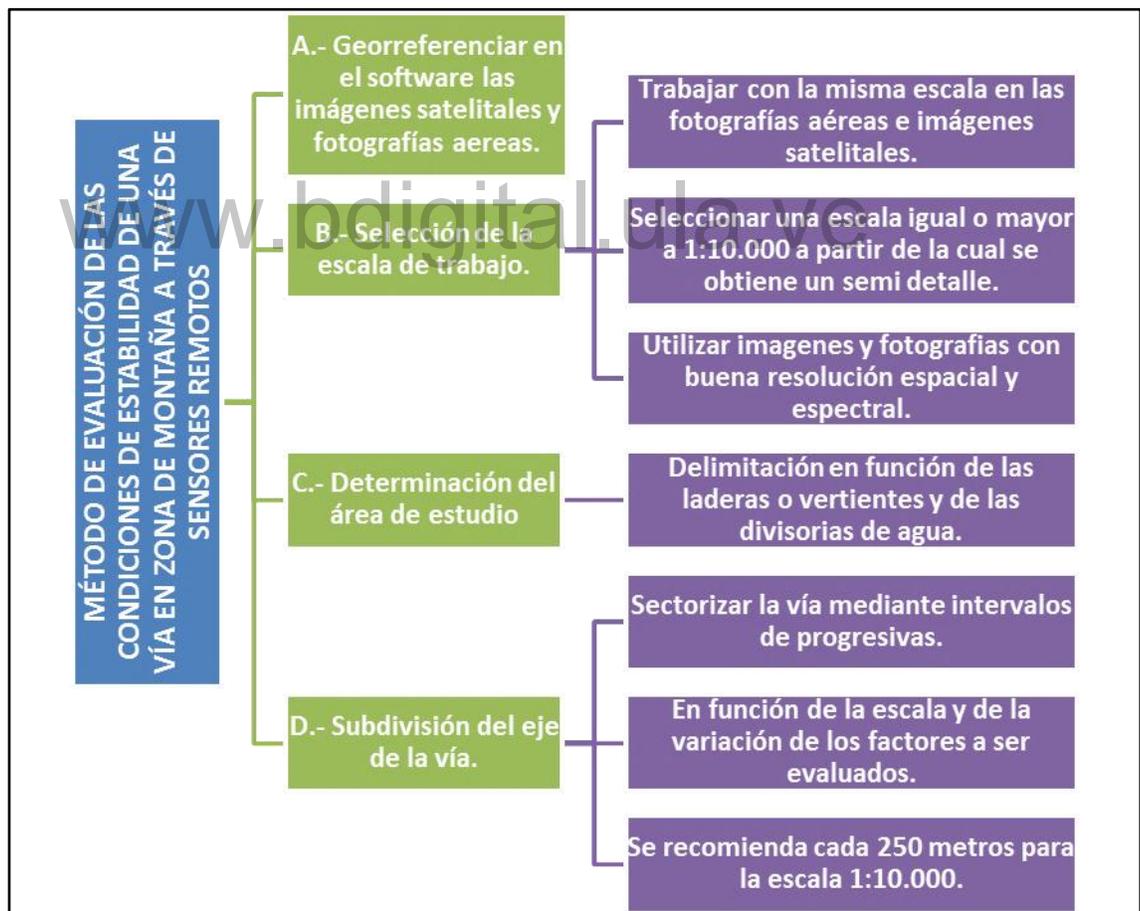


Figura 10. Esquema. Método de Evaluación. Georreferenciación, escala de trabajo, área de estudio, subdivisión del eje.

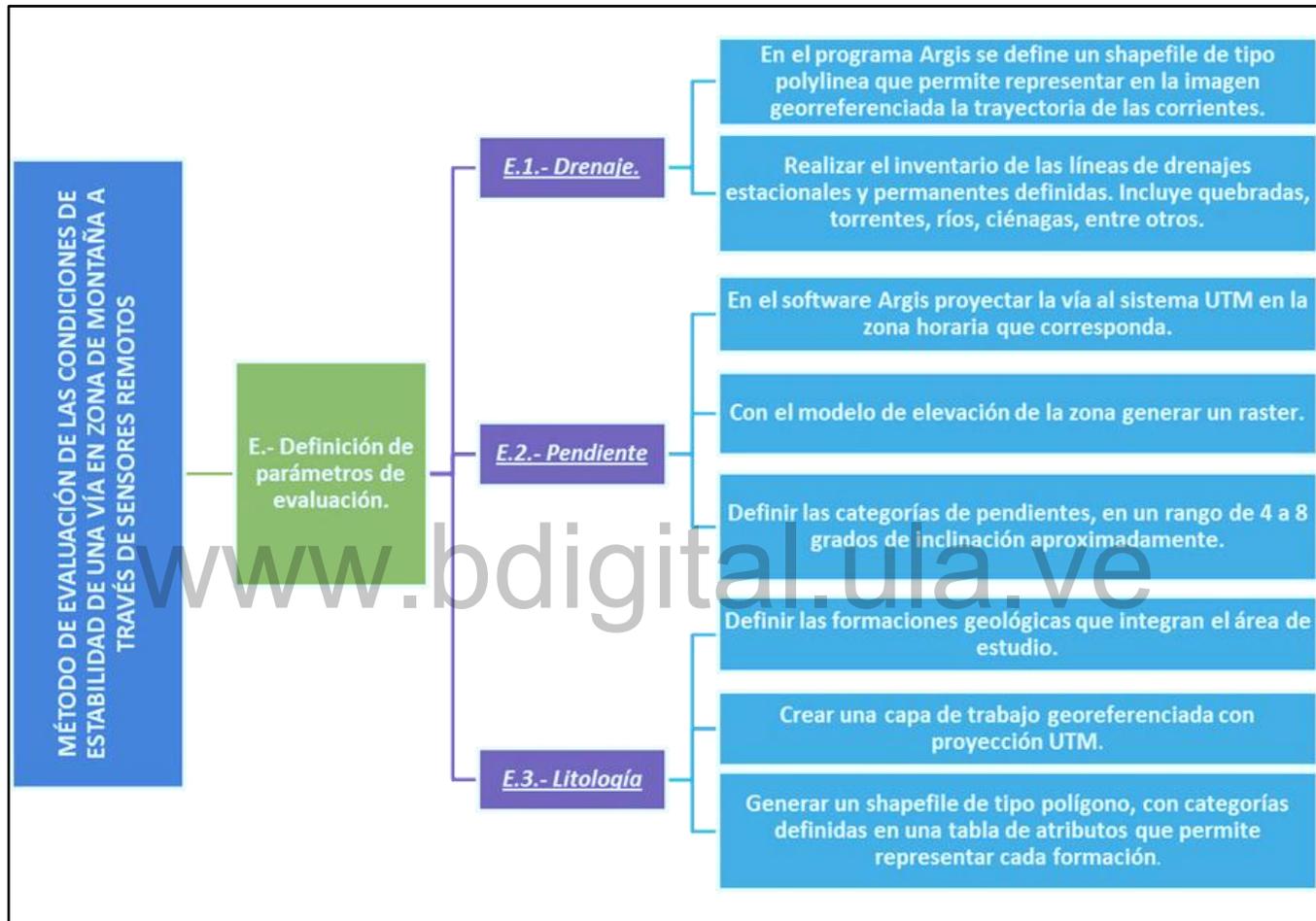


Figura 11. Esquema. Método de Evaluación. Definición de los parámetros de evaluación drenaje, pendiente y litología.

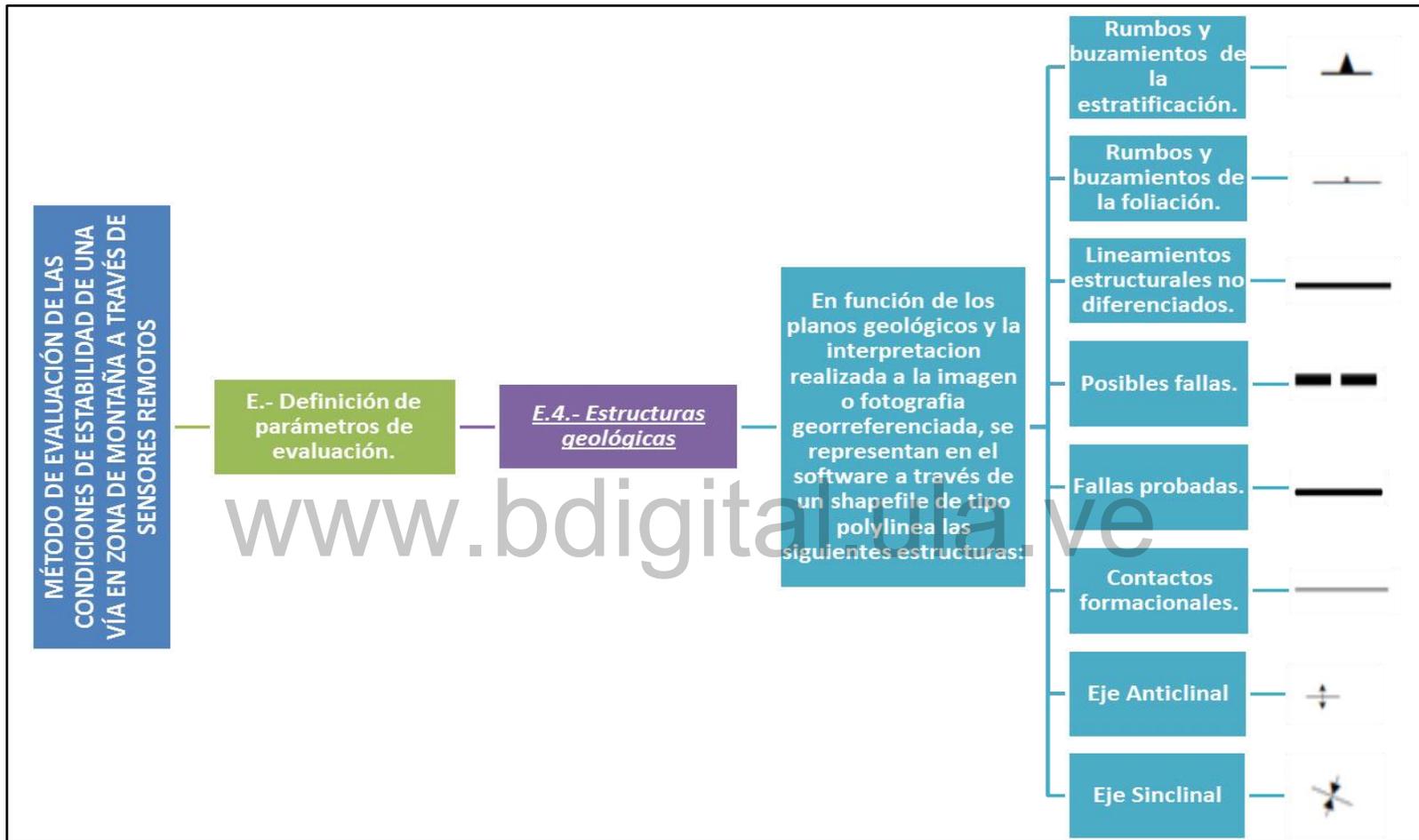


Figura 12. Esquema. Método de Evaluación.

Definición del parámetro de evaluación estructuras geológicas

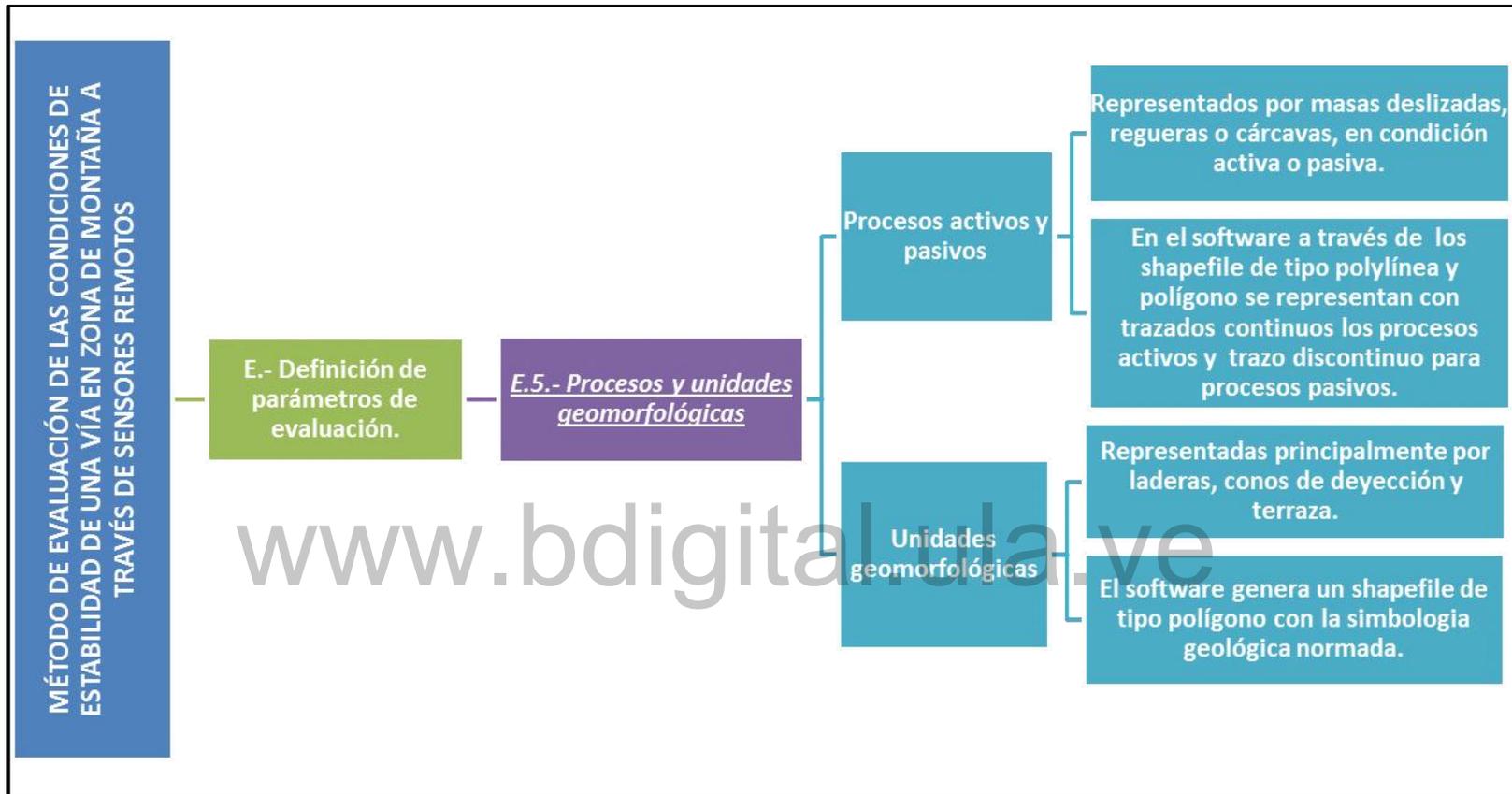


Figura 13. Esquema. Método de Evaluación.

Definición de los parámetros de evaluación, procesos y unidades geomorfológicas.

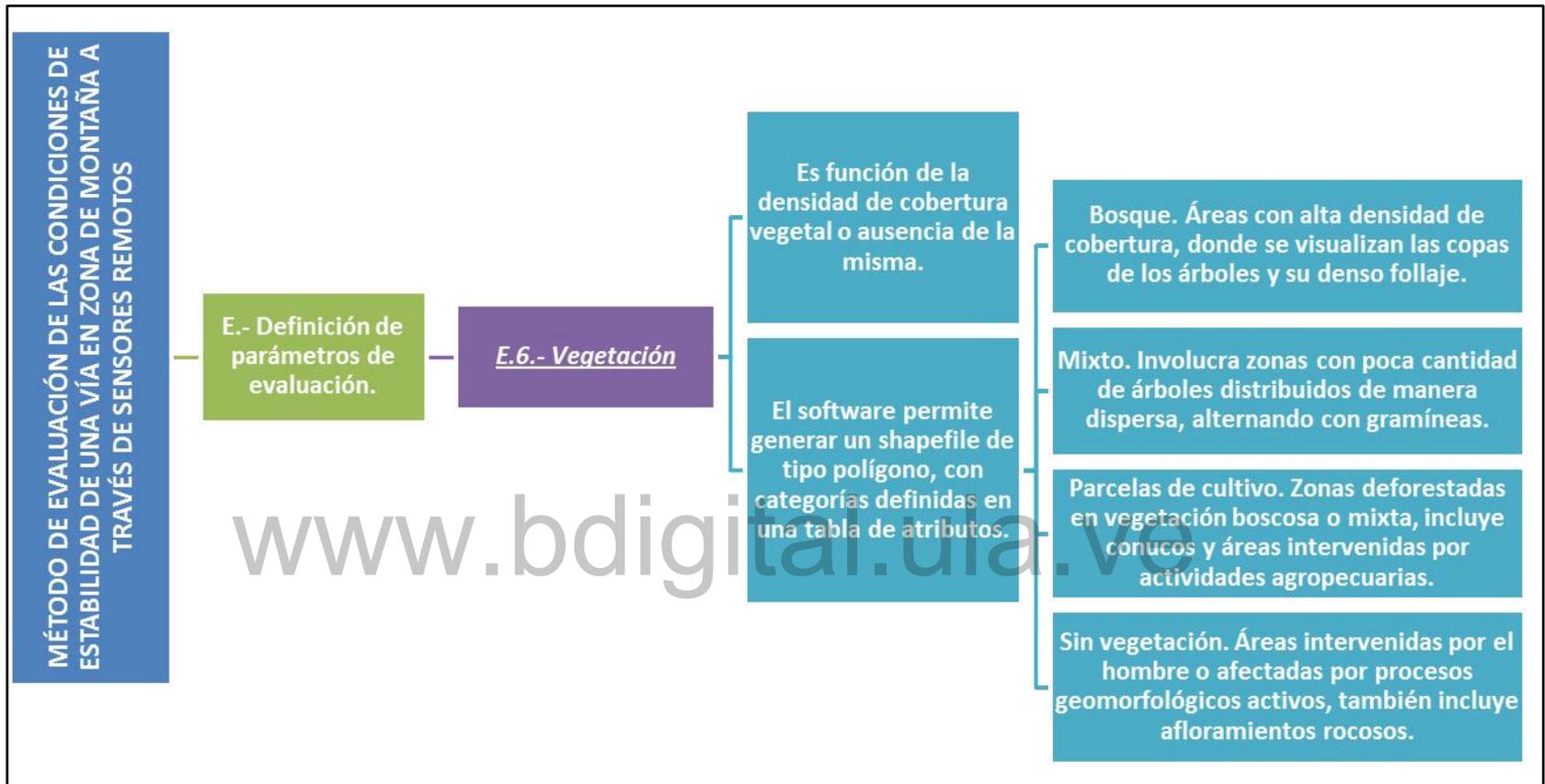


Figura 14. Esquema. Método de Evaluación.

Definición del parámetro de evaluación vegetación.

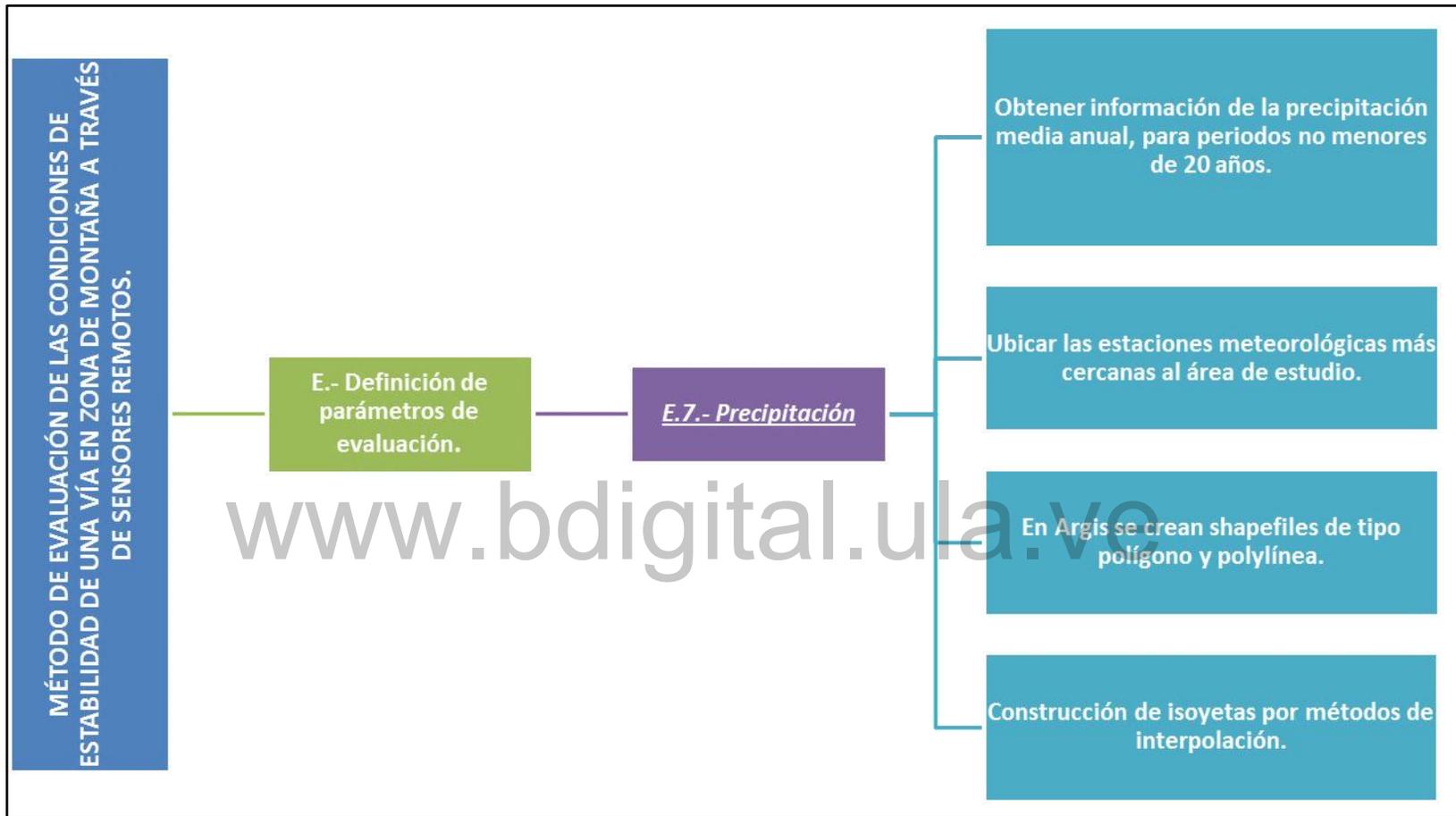


Figura 15. Esquema. Método de Evaluación.

Definición del parámetro de evaluación precipitación.

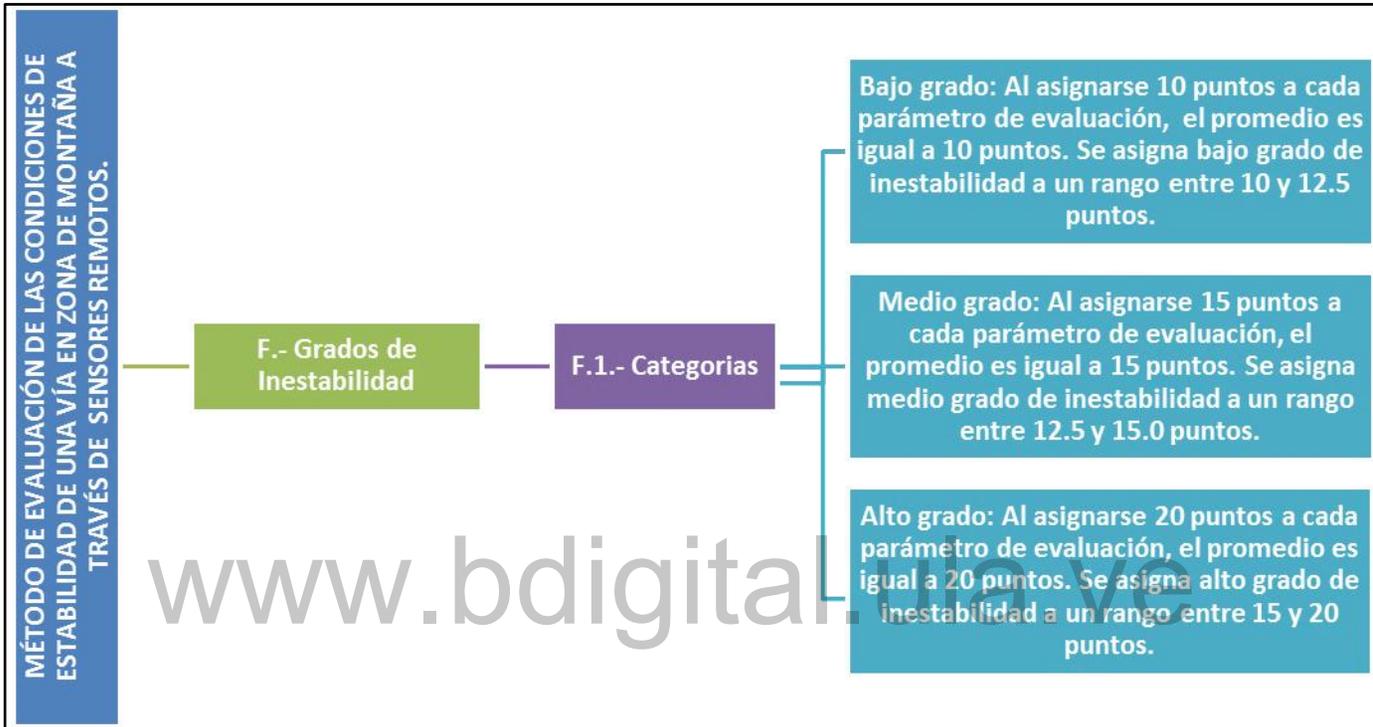


Figura 16. Grados de inestabilidad.

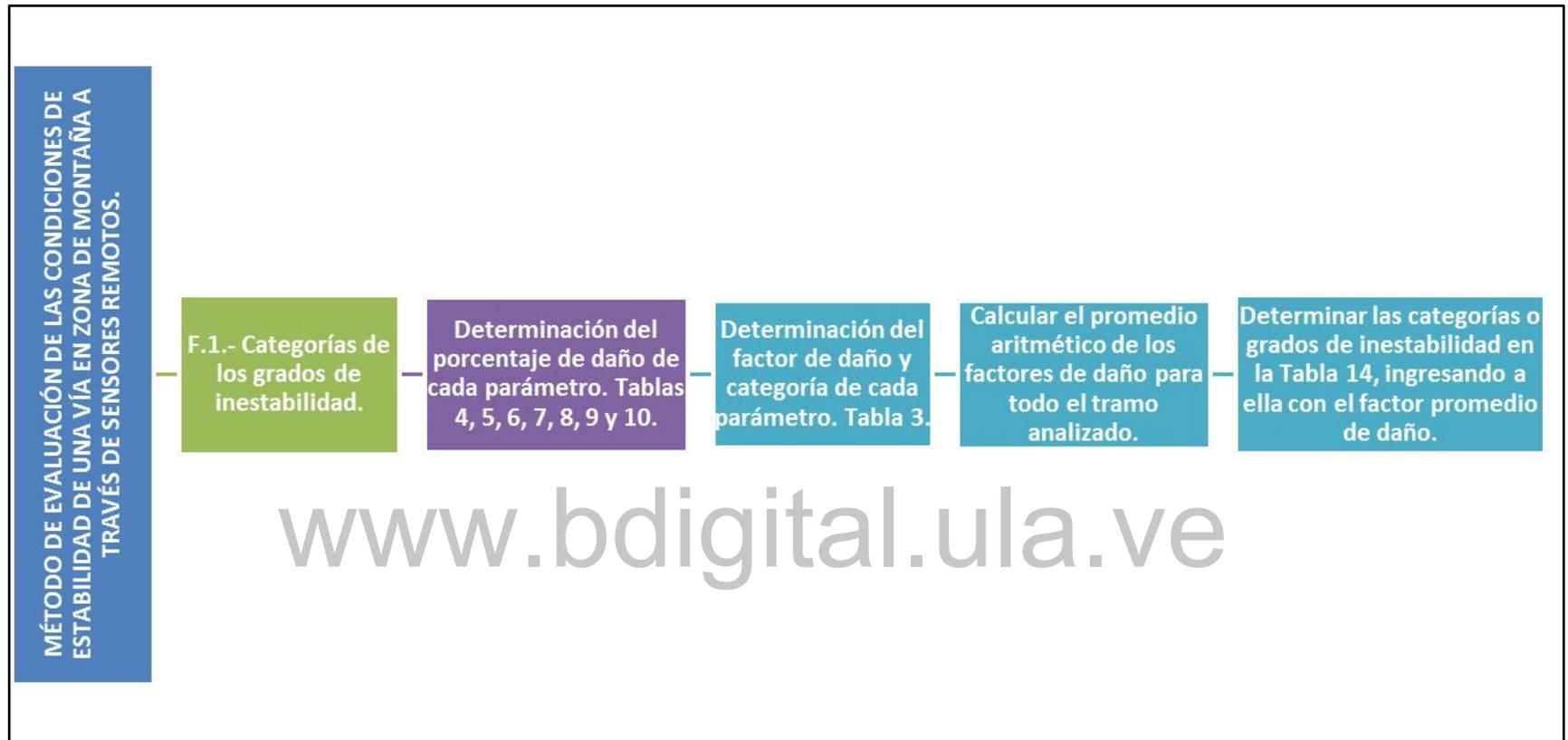


Figura 17. Determinación de los grados de inestabilidad.

4.2.1 Soporte teórico del procedimiento a seguir en la metodología de evaluación.

A continuación se presenta un soporte teórico del procedimiento a seguir en el desarrollo de la metodología de evaluación de las condiciones de estabilidad de una vía en zona de montaña. Con el fin de establecer las consideraciones y los criterios bajo los cuales se orienta el ingeniero que desarrollar el método.

A. Georreferenciación de las imágenes satelitales y fotografías aéreas.

Una vez obtenida la información suministrada por los sensores remotos, ésta debe georreferenciarse, en el software seleccionado. En este caso representado por el sistema de información geográfico Argis. Se debe considerar la zona horaria correspondiente a la ubicación de la vía, de la proyección UTM del sistema de referencia REGVEN.

A continuación se presenta un extracto de la Figura 10. Se identifica este paso como A en el desarrollo del método.

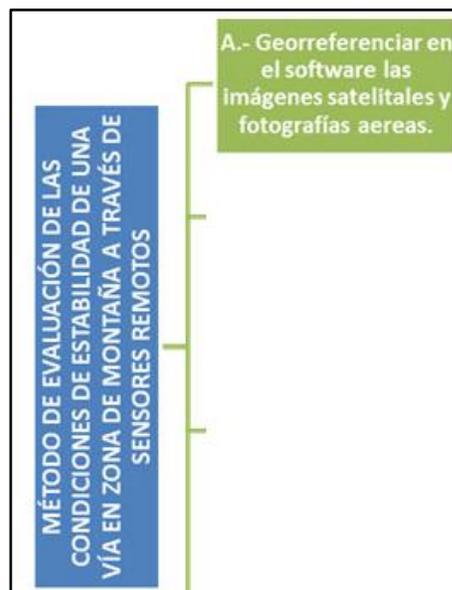


Figura 18. Paso A.

B. Selección de la escala de trabajo.

La escala seleccionada debe satisfacer las demandas de detalle en cuanto a la observación de la calzada, de los taludes de corte y relleno y de las obras de paso existente, como elementos principales de la vía. De la misma manera debe lograrse la observación clara de todos los elementos presentes en la imagen satelital y en la fotografía aérea, a través de la nitidez de los píxeles, considerando la resolución espacial y espectral de las mismas.

La selección de la escala apropiada permite un análisis adecuado de los factores de drenaje, pendiente, litología, estructuras geológicas, procesos y unidades geomorfológicas, vegetación y meteorización.

A continuación se presenta un extracto de la Figura 10. Se identifica este paso como B en el desarrollo del método.



Figura 19. Paso B.

C. Determinación del área de estudio.

Por ser áreas características de zona de montaña, debe tenerse especial atención en la definición de dos aspectos fisiográficos que inciden directamente en la estabilidad de la carretera; las laderas o vertientes y las divisorias de agua.

En el proceso de construcción se perturban los elementos del medio físico presentes en las laderas, generando procesos desestabilizadores de la vía desde o hacia la misma. Es así como desde aguas arriba, incluyendo la divisoria de aguas se originan deslizamientos y desde el río se pueden producir cárcavas en erosión remontante.

A continuación se presenta un extracto de la Figura 10. Se identifica este paso como C en el desarrollo del método.

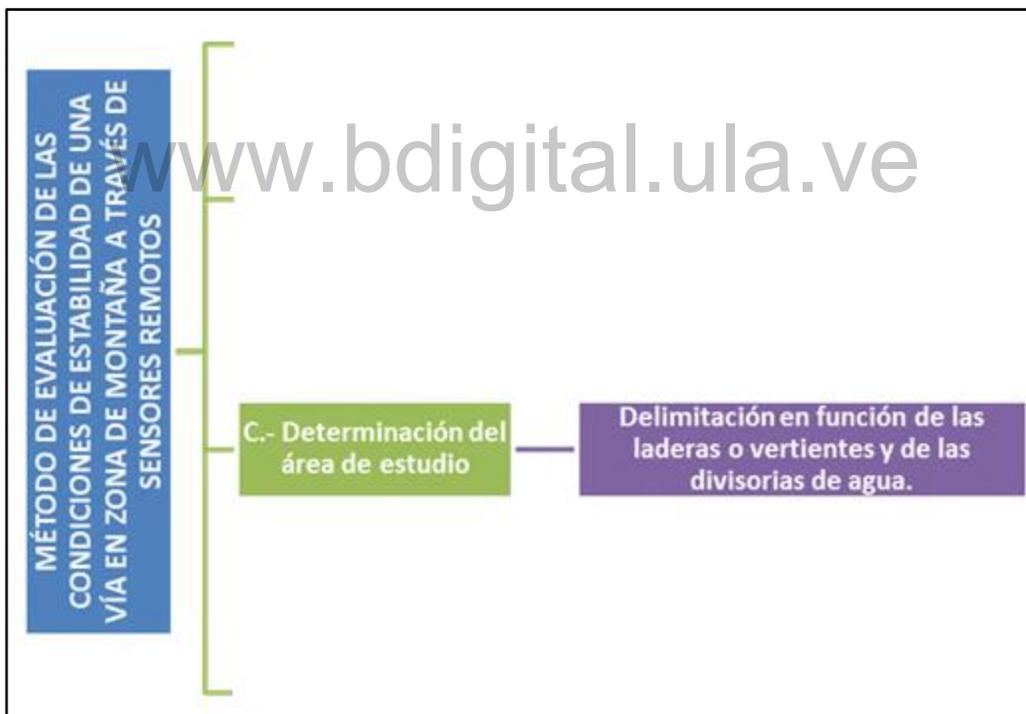


Figura 20. Paso C.

D. Subdivisión del eje de la vía.

Por ser 1:10.000 una escala de semi detalle se requiere el sectorizar la vía mediante intervalos de progresivas cada 250 metros. Por cuanto las dimensiones

mismas tanto longitudinales como de sección transversal exigen un nivel de análisis de los procesos de inestabilidad que puedan ser identificados, evaluados y delimitados.

A continuación se presenta un extracto de la Figura 10. Se identifica este paso como D en el desarrollo del método.

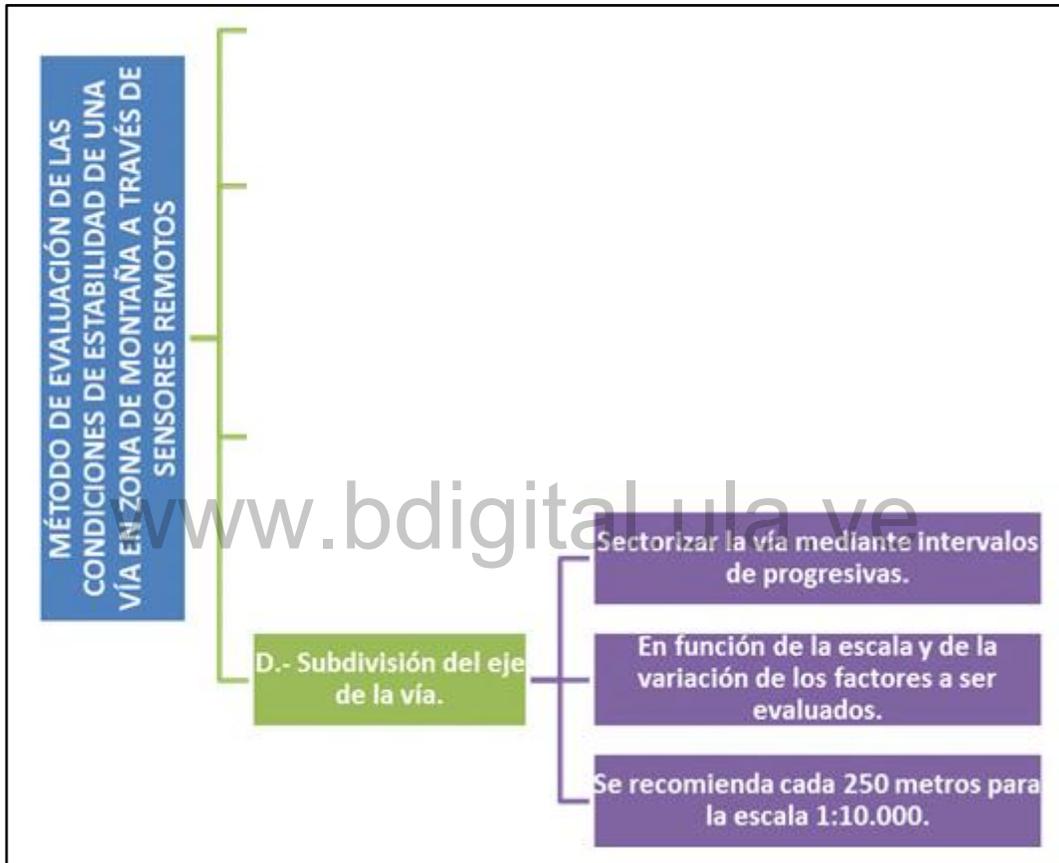


Figura 21. Paso D.

E. Parámetros de evaluación.

La metodología desarrollada se fundamenta en la visualización e interpretación técnica de imágenes satelitales y fotografías aéreas, a partir de la aplicación de los conocimientos teóricos y prácticos que posee el ingeniero civil y demás profesionales del área, respecto a la geología, geomorfología, geotecnia y vialidad. A través de la determinación y análisis de capas o planos de trabajo mediante la utilización del

software Argis, se generan factores de correlación que definen las condiciones de estabilidad de la vía a través de la categorización de los grados de estabilidad.

Los parámetros a ser considerados en el método de evaluación están orientados a ser la máxima representación de la zona de estudio en un esquema cuantitativo y/o cualitativo. Se establece a su vez la correlación de los mismos como medida para definir los niveles de estabilidad.

E.1.- Drenaje.

Contempla el inventario de las líneas de drenajes estacionales y permanentes definidas por el relieve y que incluye quebradas, torrentes, ríos, ciénagas, entre otros. Con la utilización del programa Argis se define un shapefile de tipo polylinea que permite representar en la imagen la trayectoria de las corrientes.

A continuación se presenta un extracto de la Figura 11. Se especifica este paso como E.1 en el desarrollo del método.

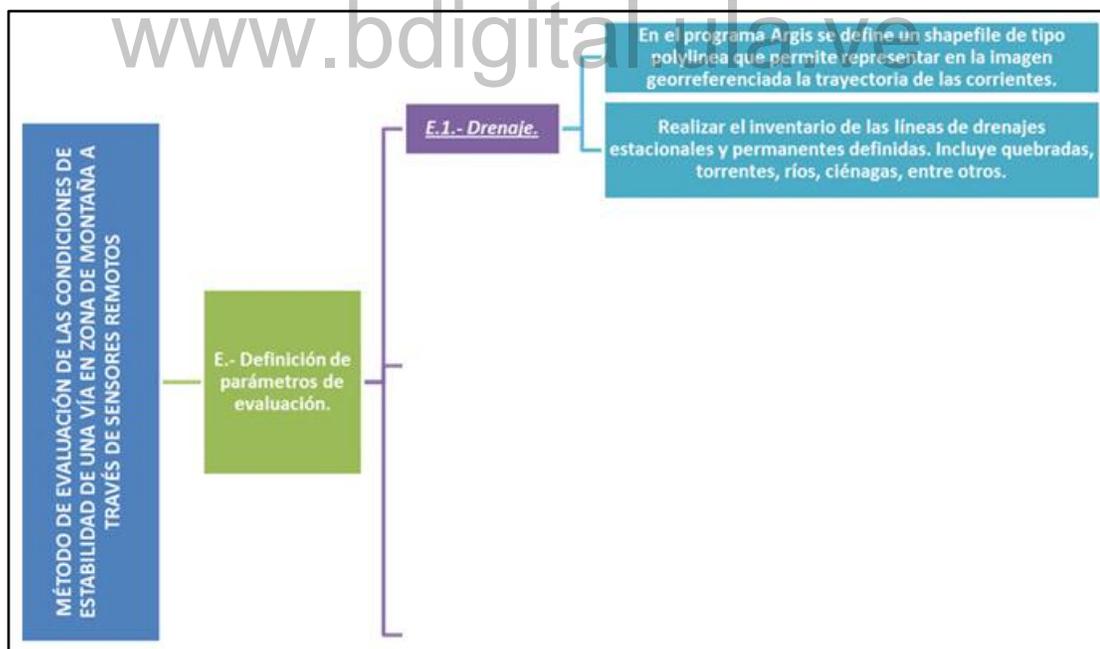


Figura 22. Paso E.1.

E.2.- Pendiente.

A través de un modelo de elevación de la zona, se genera un raster. En éste se definen las categorías para clasificar la pendiente del área delimitada.

Se toma como referencia el principio de clasificación de Varnes (1978), y en función al estudio del factor, donde la mínima variación de pendiente en las laderas incide en la estabilidad vial, se recomienda un rango de análisis de 4 a 8 grados de inclinación. Con la finalidad de determinar la influencia de las mismas en los diferentes niveles de estabilidad de acuerdo a su interacción con los demás factores presentes.

A continuación se presenta un extracto de la Figura 11. Se especifica este paso como E.2 en el desarrollo del método.

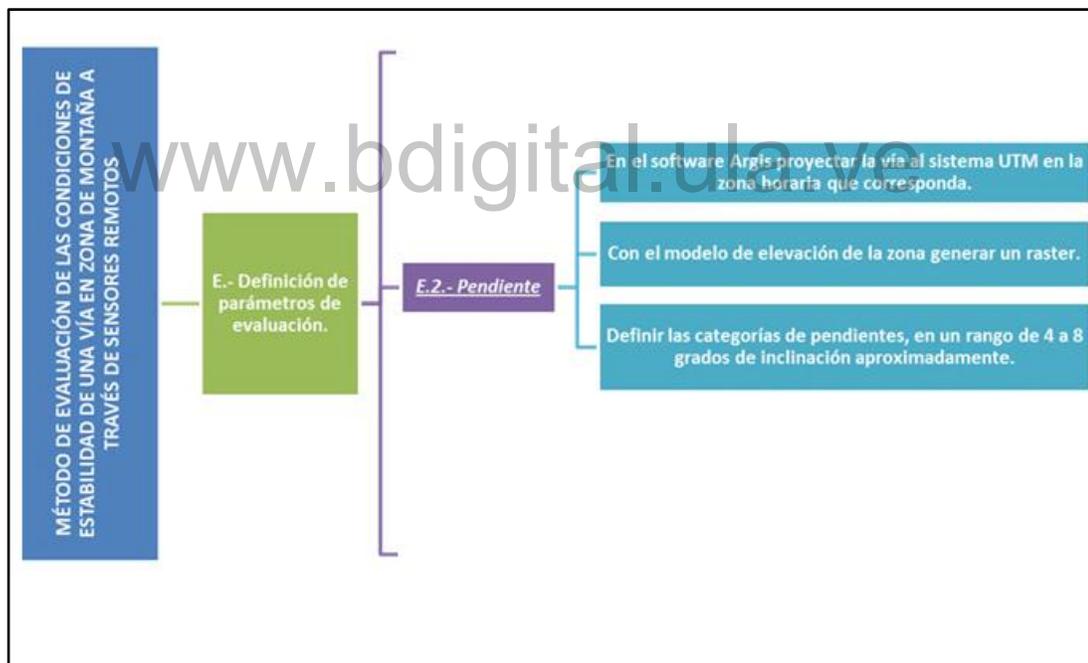


Figura 23. Paso E.2.

E.3.- Litología.

Representada por las formaciones geológicas que afloran en el área de estudio y sobre las cuales se construyó la carretera, siendo determinante la génesis, tipos de roca y grado de alteración. El software permite generar un shapefile de tipo polígono,

con categorías definidas en una tabla de atributos que permite representar cada formación. La obtención del plano geológico de la zona se hace determinante.

A continuación se presenta un extracto de la Figura 11. Se especifica este paso como E.3 en el desarrollo del método.

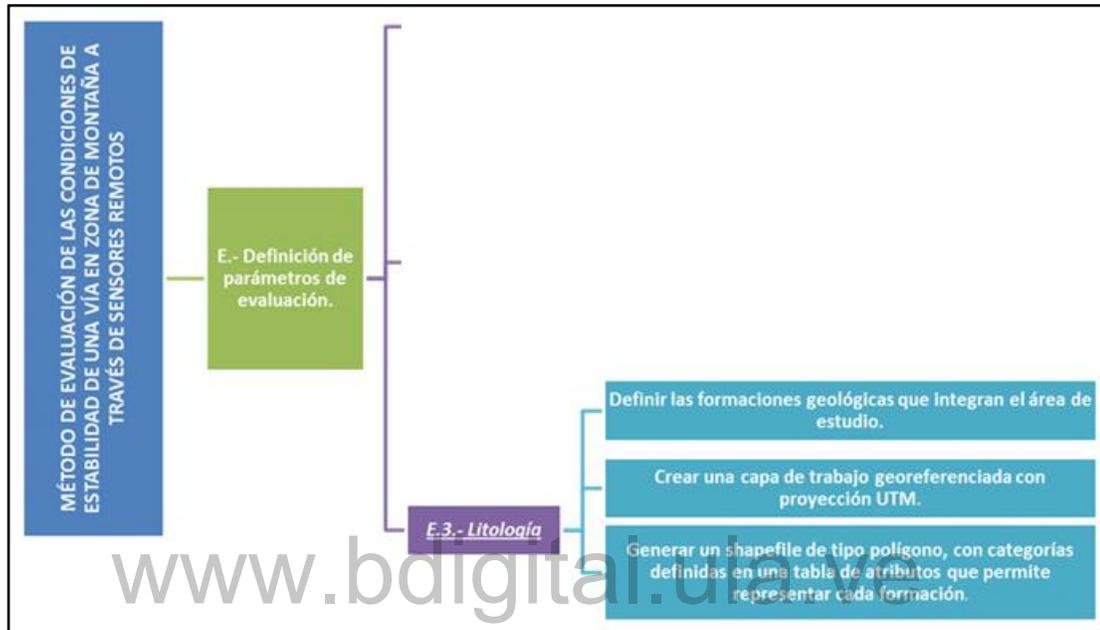


Figura 24. Paso E.3

E.4.- Estructuras geológicas.

Siendo el resultado del desarrollo del relieve; se distinguen: rumbos y buzamientos de ángulo alto, medio y bajo interpretados de la estratificación, rumbos y buzamientos de ángulo alto, medio y bajo interpretados de la foliación, lineamientos estructurales no diferenciados, posibles fallas, fallas probadas y contactos formacionales.

Esta capa de trabajo se representa en el software a través de un shapefile de tipo polylinea que permite definir en la imagen la trayectoria de las estructuras, en función a su simbología. Como recurso de trabajo se puede considerar la utilización de los planos geológicos de la zona.

A continuación se presenta un extracto de la Figura 12. Se especifica este paso como E.4 en el desarrollo del método.

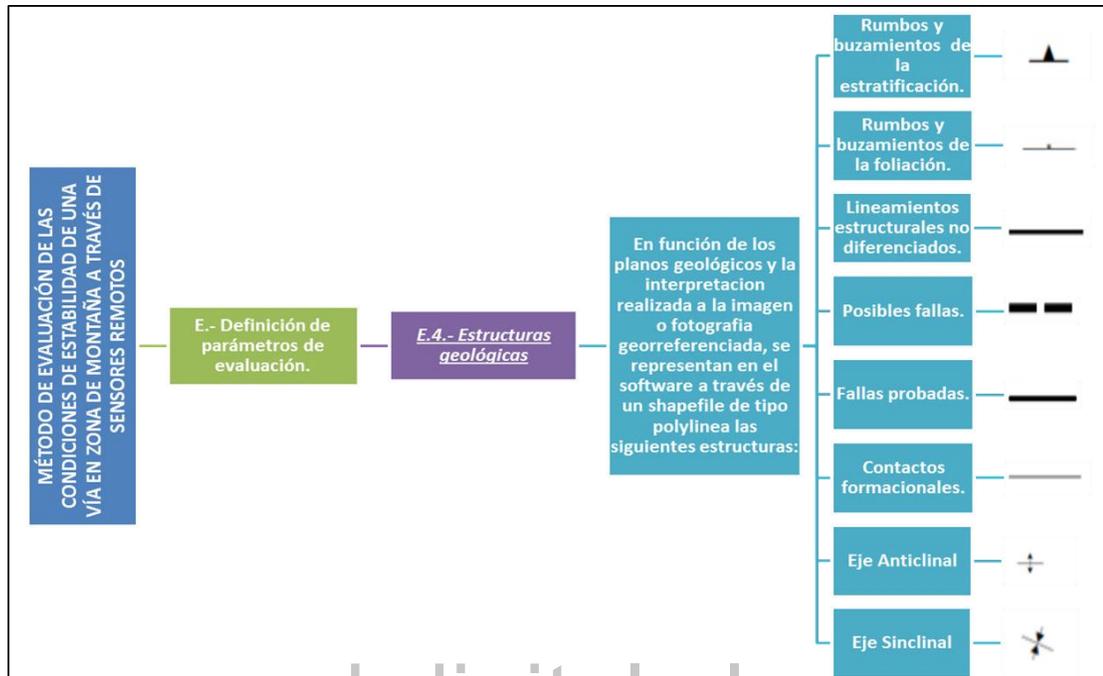


Figura 25. Paso E.4

E.5.- Procesos y unidades geomorfológicas.

✓ *Procesos activos y pasivos.*

Representados por masas deslizadas, regueras o cárcavas. En condición activa son visualizadas en la imagen satelital. Mientras que el análisis fotogeológico permite definir esos mismos procesos en las condiciones en que se encontraban para el momento de la toma de las fotografías aéreas, pudiendo así establecer su evolución a lo largo del tiempo.

Esta capa de trabajo se representa en el software a través de los shapefile de tipo polilínea y polígono que permiten representar en la imagen la actividad o inactividad del proceso. Todos estos procesos son determinantes en los niveles de estabilidad de los diferentes tramos de la vía.

A continuación se presenta un extracto de la Figura 13. Se especifica este paso como E.5 en el desarrollo del método.

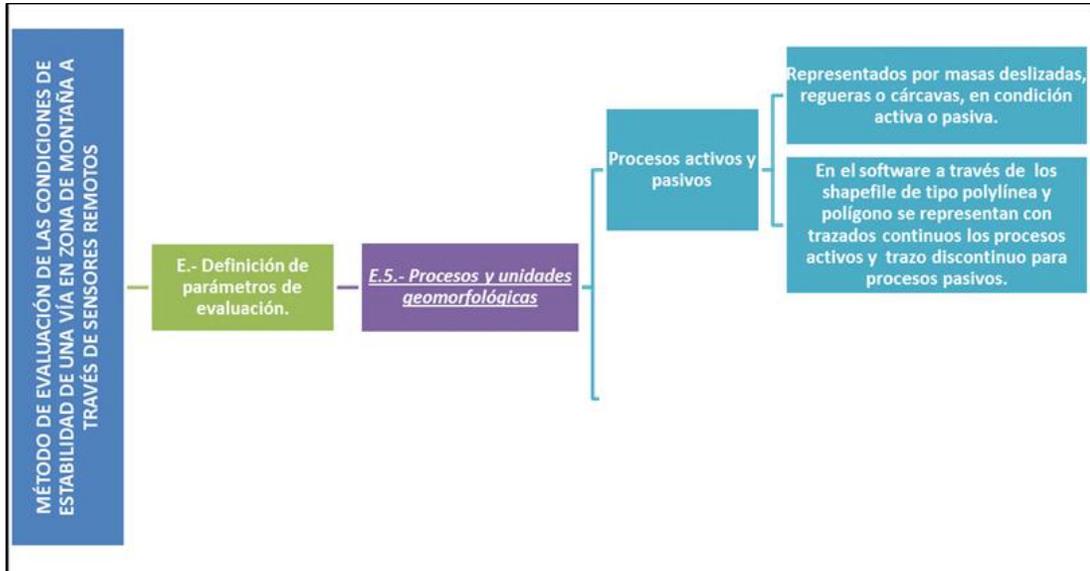


Figura 26. Paso E.5.

www.  Unidades geomorfológicas. ula.ve

Representadas principalmente por laderas, conos de deyección y terraza, y de acuerdo al tipo de material que los compone y sector de los mismos donde fue fundada la carretera se puede determinar grados de estabilidad de la vía. El software permite generar un shapefile de tipo polígono.

A continuación se presenta un extracto de la Figura 13. Se especifica este paso como E.5 en el desarrollo del método.

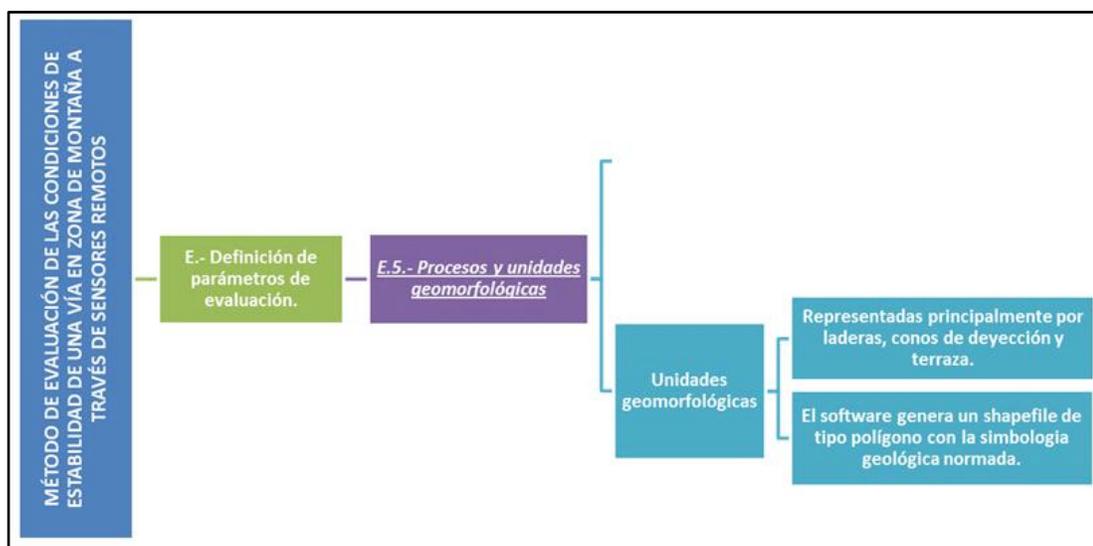


Figura 27. Paso E.5

E.6.- Vegetación.

Se caracteriza de acuerdo a la densidad de cobertura vegetal o ausencia de la misma, bajo el principio de clasificación de Alcaraz (2013), y se agrupa en las categorías citadas a continuación.

El software permite generar un shapefile o formato de almacenamiento de tipo polígono, con categorías definidas en una tabla de atributos que permite representar cada cobertura.

Bosque, áreas con alta densidad de cobertura, donde se visualizan las copas de los árboles y su denso follaje. Se observa en las fotografías aéreas tonos de gris oscuro y en la imagen satelital multiespectral color natural con tono verde oscuro.

Mixto, involucra zonas con poca cantidad de árboles distribuidos de manera dispersa, alternando con gramíneas. Se visualiza una textura lisa en las áreas correspondientes a las gramíneas, alternando con conjuntos de puntos representativos de los árboles. En las fotografías aéreas se distinguen tonos de gris claro y puntos de gris más oscuro, mientras que en la imagen satelital multiespectral de color natural este tipo de vegetación es de una tonalidad de color verde claro con marrón.

Parcelas de cultivo, comprende zonas deforestadas en vegetación boscosa o mixta. Incluye conucos y áreas intervenidas por actividades agropecuarias.

Sin vegetación se identifican áreas intervenidas por el hombre o afectadas por procesos geomorfológicos activos. También incluye afloramientos rocosos.

A continuación se presenta la Figura 14. Se especifica este paso como E.6 en el desarrollo del método.



Figura 28. Paso E.6.

E.7.- Precipitación.

El método contempla el análisis de las condiciones de precipitación de la zona en estudio, motivo por el cual resulta de imperial importancia obtener información de la precipitación media anual para la construcción de isoyetas, tomando en cuenta las estaciones meteorológicas más cercanas al área de estudio, para periodos no menores de 20 años. El software utilizado en dicha investigación permite a través de métodos de interpolación generar las isolíneas de precipitación.

Se crea un shapefile de tipo polígono, que de manera ilustrativa por degradación de colores representa las zonas con mayor y menor precipitación. Así como un shapefile de tipo polylínea para representar el valor de cada línea de precipitación. El

objetivo de este factor de interpretación es definir la estabilidad de la vía en función de los valores de precipitación mostrados por las isoyetas, característicos de las condiciones atmosféricas y climáticas de la zona.

A continuación se presenta la Figura 15. Se especifica este paso como E.7 en el desarrollo del método.

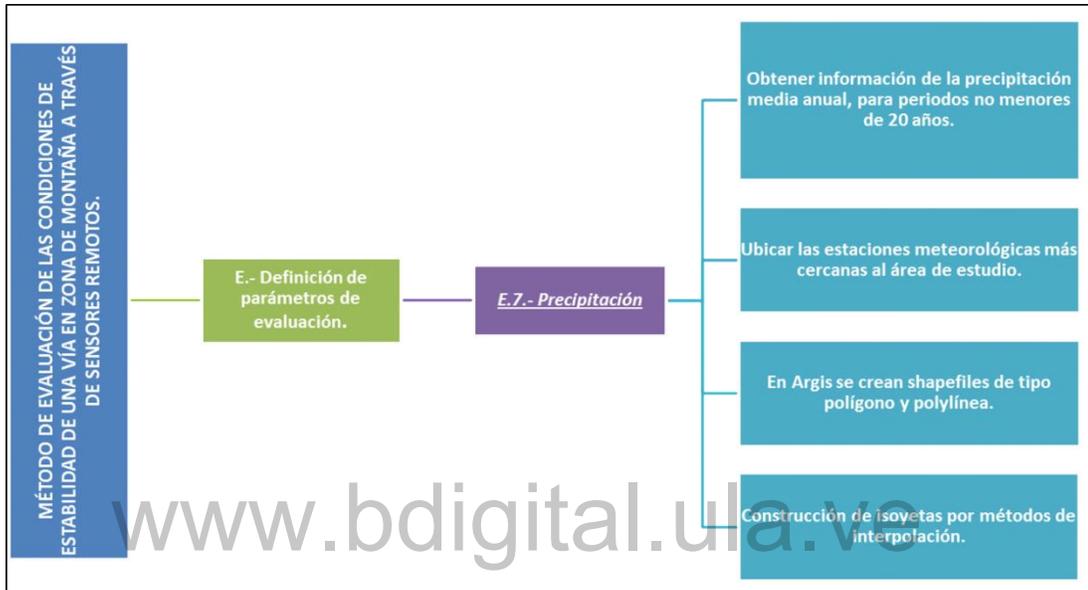


Figura 29. Paso E.7

4.3.- Guía para el procesamiento de los parámetros de evaluación.

Una vez definidos los parámetros de evaluación, el ingeniero debe tomar en cuenta para el procesamiento de cada uno, una serie de consideraciones que permiten relacionarlos directamente con la estabilidad de la vía. Posteriormente el análisis de cada parámetro se conjuga con el de los demás.

E.1.- Drenaje.

El mismo juega un importante papel para la estabilidad de la vía por cuanto, y junto a la gravedad resulta un factor desencadenante en los procesos desestabilizadores de los tramos viales. Se enumeran a continuación aquellos aspectos del mismo que se correlacionan con una carretera:

- Todo drenaje existente resulta intersectado por un corredor vial, originando respuestas positivas y negativas de ambos lados.
- Se requiere definir la jerarquización de los diferentes cursos de agua a ser intersectados. Así se precisa el funcionamiento de las obras de paso instaladas.
- Se hace necesario también el identificar, analizar y clasificar la dinámica de aporte de los detritos en tránsito por los canales intersectados por la vía. Se determinan así las acciones correctivas a que haya lugar.
- Se requiere el análisis de las geoformas. Las cóncavas, donde se concentra la escorrentía y el tramo ocurre mediante relleno para mantener geometría y las convexas, donde la misma se reparte de manera radial.
- Es preciso diagnosticar interrupciones del cauce por motivos antrópicos aguas debajo de la vía, que inciden en la distorsión del drenaje natural, ocasionando procesos erosivos con acción remontante.
- Es necesario diagnosticar el funcionamiento de las obras de paso existentes. En el sentido de que las mismas y con el correr de los años hayan producido efecto dique junto al terraplén de acceso inmediato en zonas cóncavas. Se determina entonces si su ubicación es perpendicular a la corriente de flujo, ya

que puede ocurrir que con el tiempo los drenajes naturales cambien de orientación como consecuencia de procesos de sedimentación o de acción antrópica. Se evita así socavación y afectación de pilas, aletas o cualquier elemento de fundación.

- El análisis e interpretación de esta capa de trabajo permite conocer la influencia que posee en: el desarrollo de la vegetación, ya que esta se incrementa al aumentar el contenido de humedad del suelo. En la aceleración de los procesos geomorfológicos degradacionales con la activación de cárcavas, regueras y masas deslizadas. En la generación de unidades geomorfológicas y la interrelación de algunos lineamientos estructurales con la definición de los cauces.
- En el proceso de fotointerpretación la distinción de los diferentes cursos de agua se hace sencilla por la apreciación de los desniveles del terreno y las tonalidades de grises. En la imagen satelital la trayectoria de los cursos de agua se evidencia por la presencia de vegetación densa de tonos verdes oscuro o la observación en algunos casos del cauce y los materiales pétreos que lo componen. Esto depende de la resolución espacial y espectral de la imagen.

E.2.- Pendiente.

En función de un modelo de elevación previamente proyectado al sistema UTM en la zona horaria que corresponda a la ubicación de la vía, con el empleo del software Argis se obtiene un mapa de pendiente de la zona en estudio. En la reclasificación del mismo se destacan las categorías, cada una con un rango de valores de pendiente en grados de inclinación.

El objetivo de esta capa es determinar la pendiente de las laderas donde se construyó la vía y su influencia en la estabilidad de la misma. Para tal fin se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- De acuerdo a la composición y meteorización de la roca, la fuerza de gravedad juega un papel importante en la formación de depósitos de ladera.

Situación ésta que debe ser monitorizada para evitar la acumulación de detritos en las cunetas o bordes internos de la calzada.

- La pendiente de las laderas puede incidir en la reactivación o aparición de procesos geomorfológicos degradacionales que puedan repercutir sobre la estabilidad de la vía en menor o mayor grado.
- En función de la pendiente de la vertiente donde se encuentra fundado el canal comunicacional y atendiendo a su condición de media ladera se pueden generar desplazamientos en la zona de relleno, ya sea si esta se ubica sobre una masa deslizada o si por peso la fuerza de gravedad y un alto grado de inclinación de la ladera inciden desfavorablemente activando procesos.

E.3.- Litología.

La determinación de este factor de interpretación posee relación directa con la litología de fundación de la carretera y su área de influencia. Es necesario tomar en cuentas las consideraciones:

- Definir las formaciones geológicas existentes en la zona de estudio. Debe disponerse de un mapa geológico que permita en un trabajo documental, obtener información respecto a la descripción litológica y determinación de los contactos formacionales que puedan ser verificados en campo.
- En el software utilizado se debe crear una capa de trabajo georeferenciada en proyección UTM, dicho shapefile de tipo polígono, contentivo de una tabla de atributos, permite presentar de forma clasificada las zonas o formaciones con sus respectivas características. Identificadas de acuerdo a las edades geológicas
- En la investigación deben incluirse todas las formaciones geológicas existentes en el área de estudio, ya que se está realizando un análisis local y regional de la misma. Pudiera ocurrir por ejemplo, el transporte de detritos hacia la calzada, que en la mayoría de los casos corresponde al material que integra las laderas aguas arriba de la sección de la vía, o de estratos diferentes a la composición del lugar de fundación.

- Conocidos los tipos de materiales que integran cada formación de acuerdo a su nivel de desintegración mecánica o descomposición química se puede establecer correlación con la vegetación característica de la zona. Así como también con la pendiente de las laderas, los drenajes naturales y el estado de meteorización de las rocas; que en líneas generales depende de las condiciones climáticas de la zona, específicamente de las precipitaciones medias anuales y la temperatura media promedio.

E.4.- Estructuras Geológicas.

Constituye un factor de interpretación de fundamental importancia, ya que el relieve de cualquier zona depende del origen de las formaciones geológicas que lo integran y su interacción con las estructuras geológicas resultantes de la tectónica de placas.

- En esta fase del desarrollo de la metodología se diagnostica a través de la visión estereoscópica para el caso de las fotografías aéreas y a través de la utilización de un modelo de elevación en el caso de la imagen satelital, la ubicación de las siguientes estructuras, con la respectiva simbología:
 - ✓ Posibles fallas, representadas con líneas rectas discontinuas.
 - ✓ Fallas probadas, que se representan con líneas rectas continuas gruesas.
 - ✓ Lineamientos no diferenciados, dibujados con líneas rectas continuas finas.
 - ✓ Contactos entre formaciones, dibujados con líneas continuas de espesor medio.
 - ✓ Rumbos y buzamientos interpretados de la estratificación.
 - ✓ Rumbos y buzamientos interpretados de la foliación.
 - ✓ Ejes anticlinales, ejes sinclinales
- Se establece un inventario de cada una de las estructuras mediante fotointerpretación y a través del editor y de las herramientas de dibujo de

Arcgis se plasma la información sobre la imagen satelital, creando un shapefile denominado estructuras geológicas, proyectado en el sistema UTM.

- Las estructuras geológicas rigen en gran proporción la forma del terreno. Por ejemplo la orientación e inclinación de los planos de foliación y estratificación deben ser consideradas en los diferentes tramos de la vía y acorde a las diferentes formaciones geológicas que allí afloran se pueden determinar por ejemplo, deslizamientos de material sobre la calzada e inestabilidad de laderas.
- Normalmente los drenajes escurren aprovechando líneas estructurales existentes, en especial las relacionadas con las fallas, fracturas, planos de foliación y planos de estratificación. Las fracturas por lo general son generadoras de material detrítico que es transportado por los drenajes que a ellas se adaptan, llegando en algunos casos a evacuar material hacia los diferentes elementos de la carretera. De allí la necesidad de incluirlas en el presente trabajo.
- De otro lado, y mediante la interacción entre fotografías aéreas e imagen satelital se puede determinar qué sector de la vía quedó fundado sobre algún tipo de estructura que pudiera en cierto grado incidir en su estabilidad. En especial cuando se trata de fallas por encontrarse la carretera en área sísmica.

E.5.- Procesos geomorfológicos degradacionales y unidades geomorfológicas.

✓ Procesos geomorfológicos degradacionales.

En el análisis se recomienda:

- Crear una capa de trabajo representativa de todos los procesos geomorfológicos generados en la zona de estudio distanciados en el tiempo con el fin de monitorear el comportamiento de los mismos y su incidencia en la estabilidad del corredor
- Utilizar fotografías de diversas fechas de captura para mediante la fotointerpretación diagnosticar procesos activos y pasivos. Posteriormente se

debe interpretar la imagen satelital de fecha más actualizada, y de igual manera se identifican los procesos actuantes para esa fecha de captura. Este procedimiento permite establecer comparaciones en cuanto al mantenimiento en el tiempo de estos procesos o la recuperación de las zonas afectadas al inicio del periodo.

- En el paso de digitalización los procesos pasivos, es decir, aquellos que para la última fecha de captura ya no se visualizan o se encuentran en un alto porcentaje de recuperación, se simbolizan con líneas discontinuas de color negro. Mientras que los procesos activos, ya sean masas deslizadas, cárcavas o regueras, se simbolizan con una línea continua color negro.
- Se crea para la identificación de las masas deslizadas un shapefile de tipo polígono, donde se asignan las características internas y de borde. Las cárcavas y regueras se dibujan en un shapefile de tipo polylinea.
- Las masas deslizadas se originan por desprendimiento de la roca meteorizada y de suelo, de un sitio a partir del cual los materiales se trasladan cortas longitudes, manteniendo los detritos su forma angular y de acuerdo a su composición y resistencia a la degradación, se simbolizan los clastos angulares o redondeados. La matriz envolvente de los agregados también se representa cartográficamente tratándose de arenas limos o arcillas.
- Las cárcavas son procesos erosivos lineales que se originan en algunos casos sobre los lineamientos de las estructuras geológicas presentes y en otros sobre los suelos transportados de las unidades geomorfológicas. Inicialmente se originan canales de pocas dimensiones que se identifican como regueras y en la medida en que el proceso profundiza el canal va dando paso a las cárcavas propiamente dichas.

✓ **Unidades geomorfológicas.**

Son el resultado de procesos geomorfológicos agradacionales que identifican acumulación de sedimentos con diferente génesis, es por ello que en el presente caso se identificaron y clasificaron los conos de deyección con típica depositación en

explayamiento y las terrazas con depositación longitudinal en los laterales del río principal.

Se procede a realizar un inventario de las unidades geomorfológicas existentes en el área de estudio, dicha identificación permite establecer sobre que parte de cada unidad se fundó la carretera y en función a esto determinar el grado de estabilidad de la misma.

E.6.- Vegetación.

Este factor permite definir:

- Los tipos de cobertura del área en estudio. Para determinar la densidad de cobertura con relación a su capacidad protectora del suelo contra los procesos de erosión pluvial, el tipo de vegetación y grado de intervención antrópica.
- La consideración de las zonas en recuperación. Aquellas que han sido sujetas a procesos geomorfológicos degradacionales y que en el tiempo se han recuperado, restableciendo su vegetación, pero que son zonas de potencial peligro.
- El tipo de cobertura vegetal como reflejo de las condiciones del suelo sobre el cual se desarrolla, de los drenajes y del clima. Una zona con alta densidad se ubica sobre espesores considerables, ricos en materia orgánica y alto contenido de humedad, que en función del tipo de material que lo compone, del grado de meteorización y de las condiciones de drenaje pueden incidir negativa o positivamente en la estabilidad de la vía. Se considera a su vez el trazado geométrico donde influyen las zonas cóncavas y convexas. Las zonas con desarrollo herbáceo por el contrario, definen delgados espesores de suelo, con poca humedad y proximidad a la roca, sin incidencia negativa sobre la estabilidad.
- En el programa Arcgis se clasifican las áreas en un shapefile de polígonos.

E.7.- Precipitación.

Incide directamente en el comportamiento de los cauces, en el desarrollo de la vegetación, la generación de procesos geomorfológicos degradacionales, la generación de unidades geomorfológicas y todos los procesos de meteorización desarrollados en las rocas que componen cada formación geológica, motivos estos que permiten presentar el siguiente esquema de trabajo:

- Obtener información de precipitaciones medias anuales de al menos 4 estaciones meteorológicas próximas a la zona de estudio.
- Establecer un rango de análisis de al menos 20 años.
- Realizar en Excel una tabla de datos que contenga el nombre de cada estación, coordenadas Este, Norte y valor de precipitación media anual; dicha tabla debe ser importada por el software de trabajo con el fin de determinar la ubicación de cada estación, generando un shapefile de tipo punto proyectado en el sistema UTM en la zona correspondiente, con dicha información se delimita un área en un shapefile de tipo polígono a partir del cual se inicia un proceso de interpolación, con el empleo de la herramienta Arc toolbox, Spatial Analyst Tools, Interpolation y se selecciona el modelo de que se desee y mejor ajuste genere, en este caso se trabajó con Kriging para obtener las isoyetas o isolíneas de precipitación. Arcgis arroja como resultado franjas de precipitaciones con degradación de colores.

4.4.- Definición de los grados de inestabilidad.

Los mismos se encuentran definidos por el nivel de operatividad de los elementos que integran la vía, considerando las amenazas locales y regionales que se deriven del análisis de los factores evaluados. Dependen del nivel de afectación que posee el tramo en relación a su funcionamiento.

A cada parámetro de evaluación se le asigna un daño, en porcentaje, que depende de la evaluación de condiciones y su comparación con las referencias establecidas. Se define entonces a través de las tablas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 a continuación

presentadas. Esta evaluación se realiza en función a la influencia que ejerce cada condición en los procesos desestabilizadores de la vía, se fija un máximo peso de influencia en cuento a porcentaje de daño, como producto de la interpretación satelital comparada con la fotointerpretación y hallazgos de campo.

Para cada parámetro de evaluación se asigna un máximo porcentaje de daño de 100%.

Tabla 3. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación drenaje.

Parámetro: Drenaje			
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño
Número de cauces que intersecta la vía. Sean ríos, quebradas, torrentes, entre otros.	≤ 3	15%	0% - 5%
	> 3		6% - 15%
Presencia de depositos de agua, ya sea aguas arriba o aguas debajo de la vía. Cómo cienagas, lagunas, bolsones; que incentiven el flujo de agua en la masa de suelo.	No	15%	0%
	Si		1% -15%
Ángulo de intersección del cauce respecto a la carretera. Con el fin de determinar afectación en elementos de fundación (Estribos, pilas, cabezales, entre otros.)	90°	10%	0%
	45° - 90°		1% - 5%
	1° - 45°		6% - 10%
Presenia de obras de drenaje aguas arriba y aguas debajo de la vía. Operativas.	Si	25%	0%
	No		1% - 25%
Aporte de detritos a través de los cauces intersectados. Tránsito de detritos sobre la vía.	Si	20%	1% - 20%
	No		0%
Influencia de la escorrentia en la activación de procesos degradacionales.		15%	0% - 15%
			Σ % de daño

En la evaluación del factor drenaje con las condiciones de la Tabla 3 deben incluirse todos los cauces intersectados indiferentemente del caudal que estos conduzcan. Ante el diagnostico de depósitos de agua debe tomarse medidas de drenaje preventivas. Se asigna mayor peso al porcentaje correspondiente a las obras de drenaje paralelas y transversales a la vía, ya que su ausencia o colapso genera los principales problemas de inestabilidad. De acuerdo al tipo y volumen de material

transportado por los cauces, que a su vez transite hacia la calzada, debe asignarse un porcentaje de daño equivalente al tamaño y cantidad.

Tabla 4. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación pendiente.

Parámetro: Pendiente			
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño
Determinar si el tramo de carretera en estudio se ubica en la máxima divisoria de agua.	Si	25%	0%
	No		1% - 25%
Determinar los grados de inclinación de las laderas donde se funda la vía.	Entre 0° y 3°	45%	0%
	Entre 4° y 8°		1% - 3%
	Entre 9° y 20°		4% - 6%
	Entre 21° y 30°		7% - 9%
	Entre 31° y 45°		10% - 12%
	Entre 45° y 80°		13% - 15%
¿Actúa la gravedad negativamente sobre los taludes de corte, zonas de relleno o media ladera?	Si	15%	1% - 15%
	No		0%
La pendiente de las laderas ¿favorece los procesos degradacionales por acción remontante?	Si	15%	0%
	No		1% - 15%
			Σ % de daño

Con el fin de realizar una óptima evaluación de la Tabla 4 se debe tomar en cuenta que a medida que hay mayor proximidad hacia la máxima divisoria de agua menor es el impacto que origina la escorrentía y los procesos que se generen por efecto de la gravedad

A la inclinación de las laderas se le asigna el máximo porcentaje de daño, siendo 45%, ya que el parámetro pendiente es gobernado principalmente por dicha condición. Cabe destacar que en un mismo tramo pueden existir diferentes rangos de inclinación.

Tabla 5. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación litología.

Parámetro: Litología			
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño
El tipo de roca que integra la formación geológica donde se funda la vía ¿Qué grado de meteorización posee?.	Bajo	25%	0% - 5%
	Medio		6% - 15%
	Alto		16% - 25%
El tipo de roca que integra las formaciones geológicas de las laderas aguas arriba y aguas abajo de la carretera ¿Qué grado de meteorización posee?.	Bajo	25%	0% - 5%
	Medio		6% - 15%
	Alto		16% - 25%
¿La orientación de las estructuras de las rocas o sedimentos meteorizados, es favorable al corte?.	Si	25%	0% - 9%
	No		10% - 25%
Determinar si morfológicamente las laderas se componen de franjas salientes, con aristas constituidas por estratos de rocas más competentes, y franjas entrantes, con depresiones de rocas de menor competencia que al ser degradadas originan zanjones.	Si	25%	1% - 25%
	No		0%
			Σ % de daño

Las condiciones presentadas en la Tabla 5 poseen igual participación en la determinación del porcentaje de daño. Dependen principalmente del grado de meteorización de las rocas y de la orientación de los planos que integran los materiales de las formaciones geológicas existentes.

Tabla 6. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación estructuras geológicas.

Parámetro: Estructuras geológicas			
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño
La orientación e inclinación interpretada de los planos de estratificación y foliación. ¿Puede ser corroborado en campo?	Si	20%	0% - 9%
	No		10% - 20%
¿La orientación e inclinación de los planos de foliación y/o estratificación favorece el corte?	Si	20%	0%
	No		1% - 20%
¿Hay transporte de detritos por las líneas estructurales existentes?	Si	20%	1% - 20%
	No		0%
La carretera intersecta o se funda sobre líneas de posible falla, fallas probadas, contactos formacionales, ejes anticlinales o sinclinales?	Si	20%	1% - 20%
	No		0%
¿Hay presencia de rocas fracturadas en las laderas próximas a la calzada?	Si	20%	1% - 20%
	No		0%
			Σ % de daño

Todas las condiciones evaluadas en la Tabla 6 poseen igual peso en relación al porcentaje de daño, sin embargo, debe tenerse especial atención en la determinación de estructuras geológicas, como fallas, fracturas y contactos en el terreno de fundación y laderas, ya que las mismas determinan el comportamiento regional y local del eje carretero.

Tabla 7. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación procesos geomorfológicos.

Parámetro: Procesos geomorfológicos			
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño
¿El tramo de vía analizado está fundado sobre masas deslizadas, carvavas o regueras?. En condición activa o pasiva.	Si	25%	1% - 25%
	No		0%
¿En qué condición se observan las masas deslizadas, carcavas y regueras existentes en las laderas aguas arriba y aguas a bajo de la vía?	Activa	20%	11% - 20%
	Pasiva		1% - 10%
¿En la imagen saatlital se observan procesos en recuperación?	Si	10%	1% - 5%
	No		6% - 10%
Número de procesos que intersecta la vía, en el tramo analizado. O se ubican de forma paralela a la misma.	≤ 3	20%	0% - 10%
	> 3		11% - 20%
¿Existen óptimas condiciones de drenaje en los puntos donde la vía intersecta las masas deslizadas?	Si	25%	1% - 5%
	No		6% - 25%
			Σ % de daño

La fundación de la carretera sobre un proceso geomorfológico acarrea consecuencias de diversos índoles que aunadas a una desprovista condición de drenaje generan el 50% del daño que define éste parámetro. Tal como se indica en la Tabla 7.

Tabla 8. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación unidades geomorfológicas.

Parámetro: Unidades geomorfológicas			
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño
Identificar y numerar los conos de deyección de típica depositación en explayamiento, que intersecta la vía.	≤ 2	20%	0% - 15%
	> 2		16% - 20%
Identificar y numerar las terrazas con típica depositación longitudinal. Que intersecta la vía.	≤ 2	10%	0% - 5%
	> 2		6% - 10%
¿En qué zona la vía intersecta el cono de deyección?	Apical	20%	11% - 20%
	Distal		1% - 10%
La vía intersecta la terraza	Longitudinalmente	10%	0% - 5%
	Transversalmente		6% - 10%
¿Se estimó el tiempo de depositación de la unidad geomorfológica, a través de mapas geológicos?	Si	10%	1% - 5%
	No		6% - 10%
Estimar el grado de consolidación del material que integra la unidad agradacional. Con el fin de determinar su influencia en la fundación del canal comunicacional.	Medio/Alto	15%	5% - 10%
	Medio/Bajo		11% - 15%
Respecto a la forma del material que compone la unidad geomorfológica, es:	Redondeada	15%	5% - 10%
	Angular		11% - 15%
			Σ % de daño

La cantidad de unidades geomorfológicas presentes y el lugar donde la vía las intersecta representan el 60% de daño que arroja el parámetro analizado. Se representa esta proporción en la Tabla 8.

Tabla 9. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación vegetación.

Parámetro: Vegetación			
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño
¿El suelo está expuesto a procesos de erosión pluvial?	Si	25%	11% - 25%
	No		0% - 10%
¿Existen zonas de potencial peligro. Es decir, en recuperación de capa vegetal?	Si	20%	1% - 20%
	No		0%
Existen zonas con desarrollo vegetal	Herbáceo	25%	0%
	De alta densidad		5% - 25%
¿La vegetación de la zona de estudio se ve afectada por procesos antrópicos?	Si	15%	6% - 15%
	No		0% - 5%
El espesor de regolita o material producto de la descomposición de la roca, con materia orgánica es:	Bajo	15%	0% - 5%
	Medio		6% - 10%
	Alto		11% - 15%
			Σ % de daño

En la Tabla 9 se toma en cuenta para el análisis de la vegetación la exposición del suelo a los procesos de erosión y la capacidad del desarrollo vegetal; lo que determina la existencia o no de espesores de material favorables para el desarrollo vegetal así como las condiciones de drenaje que lo incentivan.

Tabla 10. Porcentaje de daño del parámetro de evaluación precipitación.

Parámetro: Precipitación			
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño
Estaciones meteorológicas próximas a la zona de estudio.	≤ 4	25%	10% - 25%
	> 4		0% - 5%
Años de registro de precipitaciones medias anuales.	≤ 20	25%	10% - 25%
	> 20		0% - 5%
¿Incentiva la precipitación y la humedad de la zona, la meteorización de las rocas del tramo de vía analizado?	Si	25%	15% - 25%
	No		0% - 5%
La precipitación de la zona ¿favorece la activación de procesos degradacionales?	Si	25%	10% - 25%
	No		0% - 5%
			Σ % de daño

Una evaluación exitosa de las condiciones que definen el porcentaje de daño de este parámetro depende del tipo de información meteorológica de la que se disponga.

La Tabla 10 hace referencia al número de estaciones ubicadas en la zona de estudio para las cuales debe existir un tiempo de registro mayor a 20 años de manera que las isoyetas obtenidas sean la representación máxima de la realidad.

Una vez calculado el porcentaje de daño de cada parámetro se obtiene el grado de inestabilidad y el factor de daño.

Los grados de inestabilidad son de carácter cualitativo y se hallan a través de una escala numérica, mediante la Tabla 11, se evalúa para ello el porcentaje de daño. Definida la categoría se obtiene una puntuación que representa el factor de daño para cada parámetro.

Tabla 11. Categoría - Factor de daño

% de daño	Categoría. En función al grado de inestabilidad.	Factor de daño (puntuación).
≤ 25%	Bajo	10
Entre 25% y 75%	Medio	15
> 75%	Alto	20

4.4.1.- Categorías.

Bajo grado: en el caso que el 25% o menos de los parámetros a ser evaluados interactúan desfavorablemente. Al asignarse 10 puntos a cada parámetro de evaluación, el promedio es igual a 10 puntos, en este caso el tramo analizado posee bajo grado de inestabilidad. Se asigna bajo grado de inestabilidad a un rango entre 10 y 12.50 puntos. Se aplica tratamiento preventivo.

Medio grado, entre el 25% y 75% de los parámetros a ser evaluados influyen desfavorablemente en la estabilidad de la vía. Al asignarse 15 puntos a cada parámetro de evaluación, el promedio es igual a 15 puntos, en este caso el tramo analizado posee medio grado de inestabilidad. Se asigna medio grado de inestabilidad a un rango entre 12.5 y 15 puntos. Por tal motivo se aplica tratamiento correctivo al tramo de carretera.

Alto grado: cuando los parámetros de evaluación actúan desfavorablemente en la inestabilidad en más de un 75%. Al asignarse 20 puntos a cada parámetro de evaluación, el promedio es igual a 20 puntos, en este caso el tramo analizado posee alto grado de inestabilidad. Se asigna alto grado de inestabilidad a un rango entre 15 y 20 puntos. Se amerita la atención inmediata del tramo vial.

A continuación se presenta el extracto de la Figura 16. Se especifica este paso como F en el desarrollo del método.

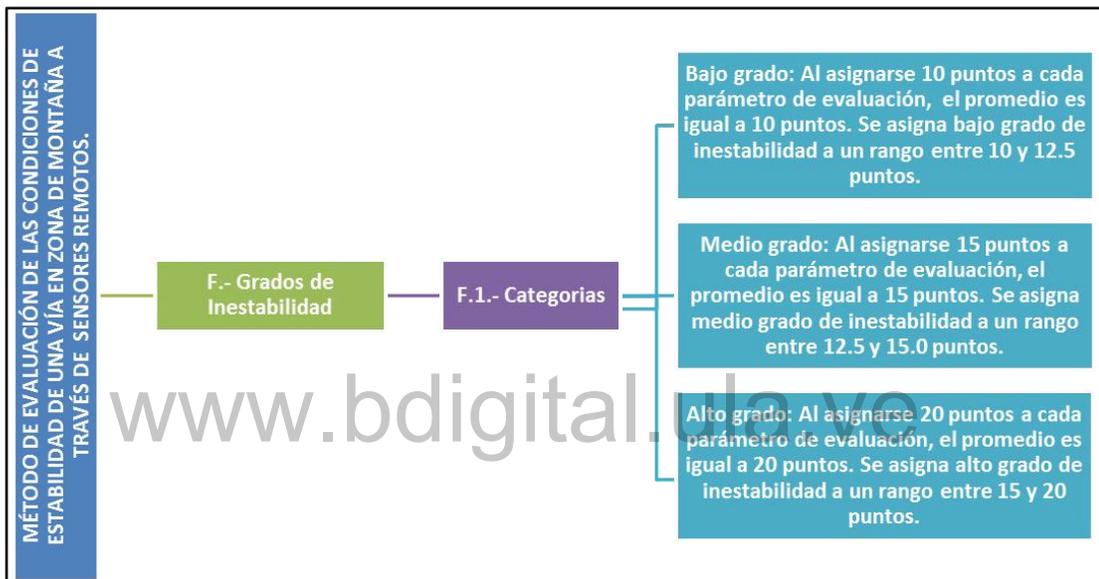


Figura 30. Paso F

Una vez aplicado el procedimiento para los 8 parámetros de evaluación se procede a realizar un promedio aritmético de las puntuaciones por factor de daño obtenidas y con éste valor a través de la Tabla 12 se selecciona el grado de inestabilidad de todo el tramo analizado.

Tabla 12. Grados de inestabilidad.

Factor de daño (puntuación).	Grado de inestabilidad.
$\leq 12,5$	Bajo
12,5 - 15	Medio
≥ 15	Alto

4.5.- Ejemplo de aplicación del método de evaluación de las condiciones de estabilidad de una vía en zona de montaña a través de sensores remotos. Carretera La Victoria – El Vigía. Mérida Estado Mérida.

A- Georreferenciación de las imágenes satelitales y fotografías aéreas.

Según el Nomenclador Oficial de Carreteras de Venezuela, MTC 1979, La carretera objeto de estudio corresponde a la Local 002 del Estado Mérida, caracterizada de la siguiente manera:

La Victoria – Cruce Mesa Bolívar 8.2 Km.

Cruce Mesa Bolívar – La Palmita 10 Km.

La Palmita – El Vigía 10.6 Km.

El área de estudio se ubica en la zona 19 de la proyección UTM del sistema de referencia REGVEN, en base a la cual se obtuvo la corrección y ortorrectificación de las imágenes utilizadas.



Figura 31. Ubicación Relativa. Local 002 del Estado Mérida. La Victoria – El Vigía.

A.1.- Adquisición de las fotografías aéreas e imágenes satelitales

A continuación se señalan los atributos técnicos de la información suministrada por sensores remotos.

- **Fotografías aéreas. Atributos técnicos**

Las fotos en físico a las cuales se tuvo acceso, corresponden a las emitidas por el M.O.P, siendo las siguientes:

Nº de foto: 359, 360, 361. Fecha: 12-8-73. Escala 1:50.000; Misión 010380

Nº de foto: 528, 529. Fecha: 8-1-74. Escala 1:50.000; Misión 010380

Nº de foto: 195, 196, 197, 198, 199, 200, 622, 623, 624, 625, 656, 657, 658, 667, 671, 613, 614, 615, 616, 587, 583, 584, 582, 579, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 596, 597, 598. Fecha: 14-7-72. Escala 1:10.000; Misión 010451

Nº de foto: 528, 529. Fecha: 14-7-72. Escala 1:10.000; Misión 010451

- **Imágenes Satelitales. Atributos técnicos**

El centro de procesamiento digital de imágenes (**CPDI**), perteneciente al Instituto de Ingeniería, como ente rector del procesamiento de información satelital a nivel nacional, ubicado en Sartenejas, en Baruta Distrito Capital, puso a disposición del trabajo de investigación durante el proceso de capacitación un conjunto de imágenes satelitales con las siguientes características; las cuales se sometieron a un proceso de revisión para determinar su idoneidad como recurso utilizado para el análisis del área de estudio. Evaluando principalmente la nubosidad, resolución espacial y resolución espectral.

Imágenes Satélite SPOT 5

Nivel de Procesamiento: 2A (corregidas y ortorrectificadas)

Código de imagen:

S090320140002869_E Tipo: Multiespectral

S090320140130872_E Tipo: Pancromatica

Nivel de Procesamiento: 1A (corregidas).

Código de imagen:

S100317165238240_E Tipo: Pancromatica

S100413163057825_E Tipo: Pancromatica

S100416152819875_E Tipo: Pancromatica

S100416152524534_E Tipo: Multiespectral

S100317165124938_E Tipo: Multiespectral

S100413162037468_E Tipo: Multiespectral

Nivel de Procesamiento: 1B (corregidas).

Código de imagen:

S090206212714154_E Tipo: Multiespectral

S090206212746856_E Tipo: Pancromatica

La resolución espacial de las imágenes del satélite SPOT de tipo pancromática es de 2.5 metros; mientras que las multiespectrales varía de 5 a 10 metros.

Imágenes Satélite LANDSAT

Código de imagen:

LC80070542016144 Tipo: Banda 8

LC80070542016032LG Tipo: COMBINACIÓN

La resolución espacial de las imágenes del satélite LANDSAT de tipo pancromática es de 15 metros; mientras que las multiespectrales es de 30 metros. Es importante destacar que las imágenes de LANDSAT no requieren corrección, ya que se emiten corregidas.

Imágenes Satélite Miranda

Código de imagen:

47437 Tipo: Multiespectral

47436 Tipo: Pancromatica

La resolución espacial de las imágenes del satélite Miranda de tipo pancromática es de 2.5 metros; mientras que las multiespectrales es de 10 metros.

Imágenes Satélite Sentinel

Código de imagen:

S2A_OPER_MS1_L1C_TL_MT1_20160605T214539 Tipo: Multiespectral

Imagen descargada a través del visor SASplanet

Raster en formato ECW, Número de bandas: 3, tamaño no comprimido: 3.58 GB, Referencia espacial WGS_1984_World_Mercator. Datum: D_WGS_1984, fecha: SAS.Planet.Release.160707.

B.- Selección de la escala de trabajo.

Por ser 1:10.000 una escala de semi detalle se requiere el sectorizar la vía mediante intervalos de progresivas cada 250 metros, por cuanto las dimensiones mismas tanto longitudinales como de sección transversal exigen un nivel de análisis de los procesos de inestabilidad que puedan ser identificados, evaluados y delimitados.

C.- Determinación del área de estudio.

Por encontrarse la vía a media ladera en la mayor parte del recorrido, se establece como límite del área a estudiar el río Chama, aguas abajo, y la divisoria de agua, aguas arriba. Definiéndose un área de 5.336 Ha.

Los anexos 1-A y 1-B presentan la ubicación de la vía en función al área de estudio.

D.- Subdivisión del eje de la vía.

Por ser 1:10.000 una escala de semi detalle se requiere el sectorizar la vía mediante intervalos de progresivas cada 250 metros.

La carretera en estudio, identificada en el Nomenclador Oficial de Carreteras de Venezuela como L002 ubica la progresiva 0+000 en el Puente Victoria y la progresiva final 26+420 en la intersección a nivel con la L008. (Carretera Rafael Caldera).

E.- Parámetros de evaluación.

E.1.- Drenaje.

Representado por quebradas, torrentes y ríos. Los anexos 2-A y 2-B son la representación gráfica de la interpretación del factor drenaje en el ejemplo de aplicación.

E.2.- Pendiente.

En función de un modelo de elevación previamente proyectado al sistema UTM de la Zona 19, con el empleo del software Argis se obtiene un mapa de pendiente de la zona en estudio, en cuya reclasificación se destacan 9 categorías, cada una con un rango de valores de pendiente de 4 a 8 grados de inclinación.

Las pendientes reclasificadas de las laderas que integran el área de estudio, se ubican en los siguientes rangos:

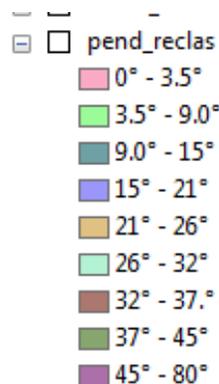


Figura 32. Reclasificación de las pendientes de las laderas de la zona de estudio.

Los anexos 3-A y 3-B son la representación gráfica de la interpretación del factor pendiente en el ejemplo de aplicación.

E.3.- Litología.

Con el mapa geológico de la zona. La Azulita Estado Mérida, de escala 1:50.000 del Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Se representaron en el software las formaciones presentes en toda el área de estudio.

Según el léxico estratigráfico de Venezuela se definen las formaciones geológicas sobre las que se emplaza la carretera en estudio. (Petroleos de Venezuela, S.A. (PDVSA), 1999)

- **Formación Tostosa.**

Descripción litológica: La Asociación Tostós constituye una secuencia de sedimentos metamorfizados, formados por pizarras, filitas, esquistos, gneises de grano fino, rocas silíceas masivas y anfibolitas. Las litologías predominantes son las filitas y esquistos, seguidos por rocas silíceas masivas, pizarras, gneises y anfibolitas. En el campo, las rocas foliadas presentan una serie de características comunes, tales como: colores verdoso a gris claro, grano fino, fuertemente deformadas y muy silíceas; las rocas silíceas masivas son de grano fino a medio y con foliación incipiente.

- **Formación Colón.**

Descripción litológica: La Formación Colón se caracteriza por lutitas microfósilíferas gris oscuro a negras, macizas, piríticas y ocasionalmente micáceas o glauconíticas, con margas y capas de caliza subordinada. Las lutitas son más arenosas hacia la base y hacia la parte superior, donde la unidad cambia transicionalmente a la Formación Mito Juan.

- **Formación Palmar.**

Descripción litológica: Sutton (1946), describe las capas basales como areniscas masivas a bien estratificadas, con marcas de rizaduras y fósiles vegetales. Heybroek (1953) hace una breve descripción de la formación: "Areniscas duras amarillas con lámina de lignito, lutitas y lutitas arenosas.

- **Formación Isnotú.**

Descripción litológica: Predominantemente arcillas (65%), con numerosas areniscas intercaladas y capas subordinadas de arcilla laminar, carbón y conglomerado. Las arcillas son macizas pero blandas, de color gris claro.

- **Formación Betijoque.**

Descripción litológica: Los elementos más destacados son capas de conglomerados macizos. La mayor parte de la unidad consiste de arcillas macizas de color gris verdoso oscuro que grada localmente a pardo y negro, generalmente arenosas, y localmente carbonáceas y fosilíferas (restos de plantas).

En el software utilizado se debe crear una capa de trabajo georeferenciada en proyección UTM Zona 19, dicho shapefile de tipo polígono, contentivo de una tabla de atributos, permite presentar de forma clasificada las zonas o formaciones con sus respectivas características.

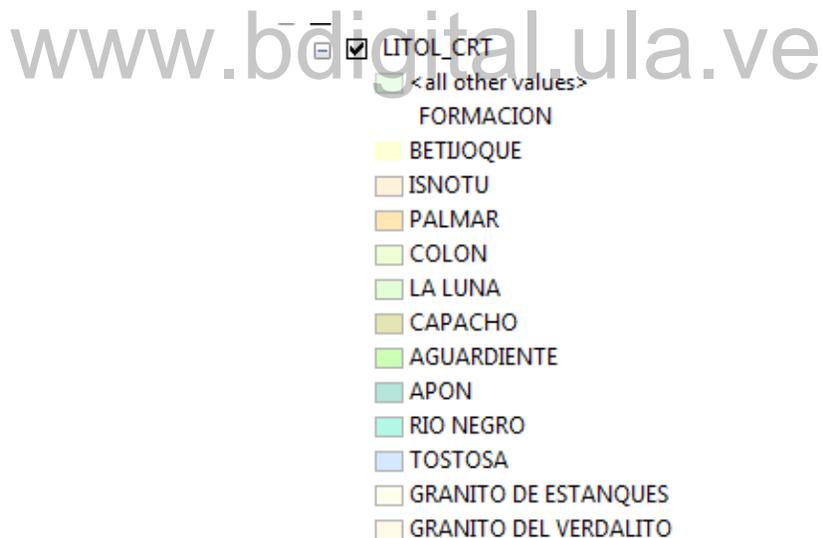


Figura 33 Formaciones Geológicas del área de estudio.

Los anexos 4-A y 4-B son la representación gráfica de la interpretación del factor litología en el ejemplo de aplicación.

E.4.- Estructuras Geológicas

Se establece un inventario de cada una de las estructuras mediante fotointerpretación y a través del editor y de las herramientas de dibujo de Arcgis se plasma la información sobre la imagen satelital, creando un shapefile, con proyección en la zona 19 del sistema UTM.

Los anexos 5-A y 5-B son la representación gráfica de la interpretación del factor estructuras geológicas en el ejemplo de aplicación.

E.5.- Procesos geomorfológicos degradacionales y unidades geomorfológicas agradacionales.

✓ Procesos geomorfológicos.

Para el análisis de la vía, la cual se ubica en zona de montaña se utilizaron fotografías aéreas de las misiones 010451 y 010380 de los años 1972 y 1973 respectivamente, y mediante la fotointerpretación se diagnosticaron procesos activos como las regueras, cárcavas y masas deslizadas, posteriormente se interpretó la imagen satelital de fecha 2016, y de igual manera se identificaron los procesos actuantes para ese tiempo de captura, este procedimiento permitió establecer comparaciones en cuanto al mantenimiento en el tiempo de estos procesos o la recuperación de las zonas afectadas al inicio del periodo.

Los anexos 6-A y 6-B son la representación gráfica de la interpretación del factor procesos geomorfológicos degradacionales en el ejemplo de aplicación de la metodología.

✓ Unidades geomorfológicas.

Son el resultado de procesos geomorfológicos agradacionales que identifican acumulación de sedimentos con diferente génesis, es por ello que en el presente caso se identificaron y clasificaron los conos de deyección con típica depositación en explayamiento y las terrazas con depositación longitudinal en los laterales del río principal.

Los anexos 6-A y 6-B son la representación gráfica de la interpretación del factor procesos geomorfológicos degradacionales en el ejemplo de aplicación de la metodología.

E.6.- Vegetación.

Este factor permite definir los tipos de cobertura del área en estudio. En esta capa de trabajo deben considerarse las zonas en recuperación.

En el programa Arcgis se clasifican las áreas en un shapefile de polígonos. Siendo las siguientes:

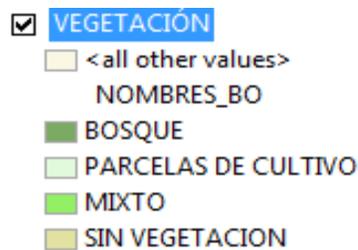


Figura 34. Vegetación del área de estudio.

Los anexos 7-A y 7-B son la representación gráfica de la interpretación del factor vegetación en el ejemplo de aplicación.

E.7.- Precipitación.

- Se obtuvo información de precipitaciones medias anuales de 8 estaciones meteorológicas próximas a la zona de estudio. Tabla 2
- Se estableció un rango de análisis de 30 años. En la aplicación del método para la Local 002 se analizaron las precipitaciones de las estaciones La Palmita, Tovar, Mesa Bolívar, El Vigia, Santa Cruz, Zea, La Cuchilla y San Pedro- Chaguará desde el año 1970 hasta el año 2000. Ver Tabla 1
- Realizar en Excel una tabla de datos que contenga el nombre de cada estación, coordenadas Este, Norte y valor de precipitación media anual; dicha tabla debe ser importada por el software de trabajo con el fin de interpolar para obtener las isoyetas como resultado muestra franjas de precipitaciones con degradación de colores.

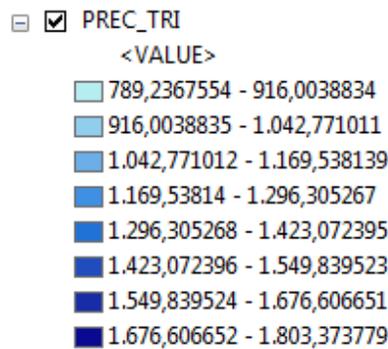


Figura 35. Rangos de precipitación media anual dela zona en estudio.

Los anexos 8-A y 8-B son la representación gráfica de la interpretación del factor precipitación en el ejemplo de aplicación.

F.- Definición de los grados de inestabilidad.

Cada uno de los parámetros evaluados, en conjunto con la capacidad de análisis del intérprete arroja un factor de valoración de la estabilidad. Este valor está en función de la generación de condiciones inestables para vialidad. Se asigna entonces a cada parámetro un grado de inestabilidad, ya sea bajo, medio o alto; con un puntaje de 10, 15 o 20 respectivamente. Y realizando un promedio se obtiene el grado de inestabilidad del tramo analizado.

G.- Correlación de los factores de interpretación

Como quiera que las laderas presentan diferentes respuestas ante el hecho vial acorde a la variedad interrelacionada de los factores del medio físico que interactúan desde y hacia la carretera, resulta recomendable establecer rangos de tramos que pudieran estar entre 1 y 3 kilómetros. Para el presente caso se han escogido tramos cada 3 Km debido a su adaptabilidad a la realidad del medio físico y clima donde la vía se encuentra asentada.

Progresivas 0+000 – 3+000

El factor de interpretación drenaje se hace presente en los primeros 3 km de la vía de forma determinante, visualizándose afluentes que convergen en cauces principales y drenajes de corto recorrido, que conducen su caudal hacia el río Mocoties. En la

progresiva 0+440 se ubica una obra de paso, tipo puente, para salvar el desnivel del canal de escorrentía de un torrente activo que denota un alto grado de inestabilidad potencial, aspecto a tomar en cuenta al momento del diagnóstico del tramo.

En las progresiva 1+960 y 2+610 la carretera intersecta el paso de quebradas, que ni en la imagen satelital ni en la fotografía aérea se observa el tipo de obra, pero en campo se corrobora la existencia de alcantarillas, destacando la ausencia de obras de drenaje superficial longitudinales o transversales.



Figura 36. Progresiva 0+440. Puente sobre torrente.



Figura 37. Progresiva 1+950. Falla de borde interno de la curva. Ausencia de cunetas o canales.

A continuación se determina, como ejemplo de aplicación, el porcentaje de daño que define el parámetro drenaje, según la evaluación de las condiciones en la Tabla 3.

Tabla 13. Determinación del porcentaje de daño, parámetro drenaje. Tramo 0+000 - 3+000.

Parámetro: Drenaje				Tramo 0+000 - 3+000
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño	% de daño
Número de cauces que intersecta la vía. Sean ríos, quebradas, torrentes, entre otros.	≤ 3	15%	0% - 5%	
	> 3		6% - 15%	10
Presencia de depósitos de agua, ya sea aguas arriba o aguas debajo de la vía. Como cienagas, lagunas, bolsones; que incentiven el flujo de agua en la masa de suelo.	No	15%	0%	0
	Si		1% - 15%	10
Ángulo de intersección del cauce respecto a la carretera. Con el fin de determinar afectación en elementos de fundación (Estribos, pilas, cabezales, entre otros.)	90°	10%	0%	
	45° - 90°		1% - 5%	5
	1° - 45°		6% - 10%	
Presencia de obras de drenaje aguas arriba y aguas debajo de la vía. Operativas.	Si	25%	0%	
	No		1% - 25%	20
Aporte de detritos a través de los cauces intersectados. Tránsito de detritos sobre la vía.	Si	20%	1% - 20%	20
	No		0%	
Influencia de la escorrentía en la activación de procesos degradacionales.		15%	0% - 15%	15
			Σ % de daño	80

La vía intersecta 6 cursos de agua, el primero de ellos en la progresiva 0+400, siendo un torrente activo, tal como se representó en el anexo 2-A, razón por la que se le asigna un porcentaje de daño de 10%.

La densa capa vegetal presente en el tramo insta a la presencia de agua subterránea que fluye hacia el río Mocoties, motivo por el cual se le asigna 10% de daño a esta condición.

Al evaluar la ubicación del puente en la progresiva 0+400 se determina que la intersección del cauce con el mismo se ubica entre 45° y 90°. Se asigna por ello 5 % de daño.

Las obras de drenaje aguas arriba y aguas debajo de la carretera se encuentran colapsadas en la mayoría de los casos, motivo por el cual se asigna un 20% de daño al evaluar la condición. Esta situación incentiva la activación de procesos degradacionales y por ende el aporte de detritos a la calzada, asignándose un 15% y 20% de daño respectivamente.

Con un 80% de daño se ingresa a la Tabla 11. Se obtiene una categoría de alto grado de inestabilidad con la asignación de 20 puntos.

Tabla 14. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro drenaje. Tramo 0+000 - 3+000.

% de daño	Categoría. En función al grado de inestabilidad.	Factor de daño (puntuación).	Tramo 0+000 - 3+000
≤ 25%	Bajo	10	
Entre 25% y 75%	Medio	15	
> 75%	Alto	20	X

La pendiente topográfica permite ubicar en este tramo oscilaciones entre 15° y 45°, ya que se encuentra fundada en fondo de valle con coberturas de unidades geomorfológicas. Factor que al ser evaluado no determina inestabilidad para la vía por sí solo.

Se determina el porcentaje de daño que define el parámetro pendiente, según la evaluación de las condiciones en la Tabla 3.

Tabla 15. Determinación del porcentaje de daño, parámetro pendiente. Tramo 0+000 - 3+000.

Parámetro: Pendiente				Tramo 0+000 - 3+000
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño	% de daño
Determinar si el tramo de carretera en estudio se ubica en la máxima divisoria de agua.	Si	25%	0%	
	No		1% - 25%	9
Determinar los grados de inclinación de las laderas donde se funda la vía.	Entre 0° y 3°	45%	0%	
	Entre 4° y 8°		1% - 3%	
	Entre 9° y 20°		4% - 6%	
	Entre 21° y 30°		7% - 9%	
	Entre 31° y 45°		10% - 12%	10
	Entre 45° y 80°		13% - 15%	
¿Actúa la gravedad negativamente sobre los taludes de corte, zonas de relleno o media ladera?	Si	15%	1% - 15%	4
	No		0%	
La pendiente de las laderas ¿favorece los procesos degradacionales por acción remontante?	Si	15%	0%	
	No		1% - 15%	2
			Σ % de daño	25

Al evaluar la ubicación de la vía respecto a la máxima divisoria de agua se visualiza que ésta se funda próxima a la base de la ladera, por lo que tiene alta incidencia sobre la calzada todos los procesos que en la vertiente se generen, incentivados por la

gravedad o escorrentía. Por tal motivo se asigna 9% de daño. Las pendientes máximas se ubican entre 31° y 45° sin representar mayor daño ya que los planos de las laderas se ubican favorables al corte. Se asigna en conjunto un 12% de daño para estas condiciones.

Con un 25% de daño se ingresa a la Tabla 11. Se obtiene una categoría de bajo grado de inestabilidad con la asignación de 10 puntos.

Tabla 16. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro pendiente. Tramo 0+000 - 3+000.

% de daño	Categoría. En función al grado de inestabilidad.	Factor de daño (puntuación).	Tramo 0+000 - 3+000
≤ 25%	Bajo	10	X
Entre 25% y 75%	Medio	15	
> 75%	Alto	20	

Sedimentos meteorizados característicos de la formación Tostosa, formados por filitas y pizarras, las cuales constituyen rocas de medio y bajo grado de metamorfismo que en la zona se muestran con delgados a medios espesores de regolita y donde la orientación de sus estructuras pasa a ser un elemento clave para la estabilidad de la vía. Señalan signos de mediana estabilidad.

Se determina entonces el porcentaje de daño que define el parámetro litología, según la evaluación de las condiciones en la Tabla 3.

Tabla 17. Determinación del porcentaje de daño, parámetro litología. Tramo 0+000 - 3+000.

Parámetro: Litología				Tramo 0+000 - 3+000
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño	% de daño
El tipo de roca que integra la formación geológica donde se funda la vía ¿Qué grado de meteorización posee?.	Bajo	25%	0% - 5%	10
	Medio		6% - 15%	
	Alto		16% - 25%	
El tipo de roca que integra las formaciones geológicas de las laderas aguas arriba y aguas abajo de la carretera ¿Qué grado de meteorización posee?.	Bajo	25%	0% - 5%	10
	Medio		6% - 15%	
	Alto		16% - 25%	
¿La orientación de las estructuras de las rocas o sedimentos meteorizados, es favorable al corte?.	Si	25%	0% - 9%	5
	No		10% - 25%	
Determinar si morfológicamente las laderas se componen de franjas salientes, con aristas constituidas por estratos de rocas más competentes, y franjas entrantes, con depresiones de rocas de menor competencia que al ser degradadas originan zanjones.	Si	25%	1% - 25%	15
	No		0%	
			Σ % de daño	40

Las filitas y pizarras presentes en la zona poseen medio grado de meteorización razón por la que se le asigna un daño de 10% en la condición de fundación y laderas adyacentes. En los zanjones la vialidad tiende a presentar mayor inestabilidad y fallas de borde, motivo por el cual se asigna en Tabla 17 un porcentaje de daño igual a 15.

Con un 40% de daño se ingresa a la Tabla 11. Se obtiene una categoría de medio grado de inestabilidad con la asignación de 15 puntos.

Tabla 18. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro litología. Tramo 0+000 - 3+000.

% de daño	Categoría. En función al grado de inestabilidad.	Factor de daño (puntuación).	Tramo 0+000 - 3+000
≤ 25%	Bajo	10	
Entre 25% y 75%	Medio	15	X
> 75%	Alto	20	

Las estructuras geológicas analizadas como factor de correlación en este tramo, están representadas por los ángulos de buzamiento interpretados de la foliación. Que en la condición más desfavorable, en la progresiva 2+000 a pesar de poseer la misma

dirección que los planos de la ladera, son de baja inclinación menor a 20° lo que favorece la estabilidad del talud de corte.

Se determina el porcentaje de daño que define el parámetro estructuras geológicas, según la evaluación de las condiciones en la Tabla 3.

Tabla 19. Determinación del porcentaje de daño, parámetro estructuras geológicas. Tramo 0+000 - 3+000.

Parámetro: Estructuras geológicas				Tramo 0+000 - 3+000
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño	% de daño
La orientación e inclinación interpretada de los planos de estratificación y foliación. ¿Puede ser corroborado en campo?	Si	20%	0% - 9%	5
	No		10% - 20%	
¿La orientación e inclinación de los planos de foliación y/o estratificación favorece el corte?	Si	20%	0%	0
	No		1% - 20%	
¿Hay transporte de detritos por las líneas estructurales existentes?	Si	20%	1% - 20%	10
	No		0%	
La carretera intersecta o se funda sobre líneas de posible falla, fallas probadas, contactos formacionales, ejes anticlinales o sinclinales?	Si	20%	1% - 20%	5
	No		0%	
¿Hay presencia de rocas fracturadas en las laderas próximas a la calzada?	Si	20%	1% - 20%	
	No		0%	0
			Σ % de daño	20

Posterior al trabajo de fotointerpretación se corroboró en campo la orientación y ángulo de inclinación de la mayoría de los planos de foliación presentes en este tramo. Lo que permite asignar 5% de daño a la condición evaluada.

La existencia de cárcavas activas favorece el tránsito de detritos hacia la calzada, asignándose por ello 10 % de daño respecto a la condición evaluada. La influencia de líneas estructurales permite asignar un 5% de daño.

Con 20% de daño obtenido en la Tabla 19, se ingresa a la Tabla 11. Se obtiene una categoría de bajo grado de inestabilidad con la asignación de 10 puntos.

Tabla 20. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro estructuras geológicas. Tramo 0+000 - 3+000.

% de daño	Categoría. En función al grado de inestabilidad.	Factor de daño (puntuación).	Tramo 0+000 - 3+000
≤ 25%	Bajo	10	X
Entre 25% y 75%	Medio	15	
> 75%	Alto	20	

Procesos geomorfológicos degradacionales en condición pasiva y activa como factor de interpretación, definen una potencial amenaza para la estabilidad de la carretera. Es así como en los sectores donde la vía coincide con zona centro apical pueden ocurrir eventuales procesos degradacionales de desborde e inundación con acarreo de materiales gruesos, altamente destructivo para los elementos de la carretera.

En los alrededores de la progresiva 1+630 se determinó la existencia de regueras en condición activa posiblemente de origen antrópico dado que es zona de bote de materiales, en tramo construido en media ladera, próxima a las progresivas comprendidas entre 0+600.000 y 0+700.000 hay contacto con una masa deslizada de aproximadamente 4.5 Ha. Al igual que en la 2+000.000 aguas arriba y paralela al cauce de una quebrada se ubica una masa deslizada pasiva de 0.6 Ha aproximadas de área. El diseño de los procesos descritos denota condiciones de mediana a alta inestabilidad.

Se determina el porcentaje de daño que define el parámetro procesos geomorfológicos, según la evaluación de las condiciones en la Tabla 3.

Tabla 21. Determinación del porcentaje de daño, parámetro procesos geomorfológicos. Tramo 0+000 - 3+000.

Parámetro: Procesos geomorfológicos				Tramo 0+000 - 3+000
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño	% de daño
¿El tramo de vía analizado está fundado sobre masas deslizadas, cárcavas o regueras?. En condición activa o pasiva.	Si	25%	1% - 25%	20
	No		0%	
¿En qué condición se observan las masas deslizadas, cárcavas y regueras existentes en las laderas aguas arriba y aguas a bajo de la vía?	Activa	20%	11% - 20%	15
	Pasiva		1% - 10%	5
¿En la imagen saletlital se observan procesos en recuperación?	Si	10%	1% - 5%	5
	No		6% - 10%	
Número de procesos que interseca la vía, en el tramo analizado. O se ubican de forma paralela a la misma.	≤ 3	20%	0% - 10%	
	> 3		11% - 20%	10
¿Existen óptimas condiciones de drenaje en los puntos donde la vía interseca las masas deslizadas?	Si	25%	1% - 5%	
	No		6% - 25%	20
			Σ % de daño	75

Al evaluar las condiciones para determinar el porcentaje de afectación se tiene que la fundación de la vía sobre masas deslizadas, regueras y cárcavas en condición activa y pasiva permite asignar un 40% de daño al tramo. Estos procesos se ven incentivados por la ausencia de drenajes en la intersección con las masas deslizados, situación que permite asignar 20% de daño.

Con 75% de daño obtenido en la Tabla 21 se ingresa a la Tabla 11. Se obtiene una categoría de alto grado de inestabilidad con la asignación de 20 puntos.

Tabla 22. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro procesos geomorfológicos. Tramo 0+000 - 3+000.

% de daño	Categoría. En función al grado de inestabilidad.	Factor de daño (puntuación).	Tramo 0+000 - 3+000
≤ 25%	Bajo	10	
Entre 25% y 75%	Medio	15	
> 75%	Alto	20	X

Respecto a las unidades geomorfológicas, entre las progresivas 0+250 y 0+530 la fundación ocurre sobre cono de deyección en su parte media – apical, posiblemente del Holoceno Medio el cual denota suelos medianamente consolidados, luego a

continuación entre las progresivas 0+530 y 0+660 la vía afecta el lateral de un cono de deyección posiblemente del Holoceno Reciente que señala suelos pobremente consolidados y de poca capacidad de soporte. De la progresiva 0+660 a la 0+700 la carretera fue fundada en zona de contacto entre el mencionado cono de deyección y la zona terminal de una masa deslizada, que si bien se muestra inactiva, pudiera ocurrir reactivación en el futuro denotando para el momento zona de estabilidad potencial.

Se determina el porcentaje de daño que define el parámetro unidades geomorfológicas, según la evaluación de las condiciones en la Tabla 3.

Tabla 23. Determinación del porcentaje de daño, parámetro unidades geomorfológicas. Tramo 0+000 - 3+000.

Parámetro: Unidades geomorfológicas				Tramo 0+000 - 3+000
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño	% de daño
Identificar y numerar los conos de deyección de típica depositación en explayamiento, que intersecta la vía.	≤ 2	20%	0% - 15%	15
	> 2		16% - 20%	
Identificar y numerar las terrazas con típica depositación longitudinal. Que intersecta la vía.	≤ 2	10%	0% - 5%	0
	> 2		6% - 10%	
¿En qué zona la vía intersecta el cono de deyección?	Apical	20%	11% - 20%	15
	Distal		1% - 10%	
La vía intersecta la terraza	Longitudinalmente	10%	0% - 5%	0
	Transversalmente		6% - 10%	
¿Se estimó el tiempo de depositación de la unidad geomorfológica, a través de mapas geológicos?	Si	10%	1% - 5%	5
	No		6% - 10%	
Estimar el grado de consolidación del material que integra la unidad agradacional. Con el fin de determinar su influencia en la fundación del canal comunicacional.	Medio/Alto	15%	5% - 10%	7
	Medio/Bajo		11% - 15%	
Respecto a la forma del material que compone la unidad geomorfológica, es:	Redondeada	15%	5% - 10%	
	Angular		11% - 15%	11
			Σ % de daño	53

A pesar de identificarse menos de dos unidades geomorfológicas se asigna la máxima ponderación ya que el cono de deyección intersectado en la progresiva 0+400 se define por un torrente activo. Por ubicarse el puente próximo a la zona apical se asigna un 15% de daño. Sin embargo, la fundación del mismo se ve favorecida por el

medio a alto grado de consolidación del material sobre el cual se funda, minimizando el porcentaje de daño.

Con el 53% de daño arrojado por la Tabla 23 se ingresa a la Tabla 11. Se obtiene una categoría de medio grado de inestabilidad con la asignación de 15 puntos.

Tabla 24. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro unidades geomorfológicas. Tramo 0+000 - 3+000.

% de daño	Categoría. En función al grado de inestabilidad.	Factor de daño (puntuación).	Tramo 0+000 - 3+000
≤ 25%	Bajo	10	
Entre 25% y 75%	Medio	15	X
> 75%	Alto	20	

Se identificó vegetación mixta en una superficie aproximada de 190 Ha, caracterizada por la existencia de árboles dispersos en medio de vegetación gramínea que señalan mediana protección del suelo a la acción erosiva de las aguas, y una extensión de aproximadamente 200 Ha bajo cultivo que identifica zona de baja protección del suelo.

Se determina el porcentaje de daño que define el parámetro vegetación, según la evaluación de las condiciones en la Tabla 3.

Tabla 25. Determinación del porcentaje de daño, parámetro vegetación. Tramo 0+000 - 3+000.

Parámetro: Vegetación				Tramo 0+000 - 3+000	
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño	% de daño	
¿El suelo está expuesto a procesos de erosión pluvial?	Si	25%	11% - 25%	18	
	No		0% - 10%		
¿Existen zonas de potencial peligro. Es decir, en recuperación de capa vegetal?	Si	20%	1% - 20%	18	
	No		0%		
Existen zonas con desarrollo vegetal	Herbáceo	25%	0%		
	De alta densidad		5% - 25%	15	
¿La vegetación de la zona de estudio se ve afectada por procesos antrópicos?	Si	15%	6% - 15%	15	
	No		0% - 5%		
El espesor de regolita o material producto de la descomposición de la roca, con materia orgánica es:	Bajo	15%	0% - 5%		
	Medio		6% - 10%	10	
	Alto		11% - 15%		
				Σ % de daño	76

La exposición del suelo a procesos de erosión pluvial permite asignar un 18% de daño a la condición. La fotointerpretación permite ubicar el tramo analizado en una zona de recuperación con alta potencialidad, asignando para ello un 15% de daño.

Una alta densidad en áreas considerables permite asumir la presencia de humedad en el suelo y espesores de material orgánico, lo que se traduce en un 15% y 10% de daño respectivamente.

Con 76% de daño arrojado por la Tabla 25 se ingresa a la Tabla 11. Se obtiene una categoría de alto grado de inestabilidad con la asignación de 20 puntos.

Tabla 26. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro vegetación. Tramo 0+000 - 3+000.

% de daño	Categoría. En función al grado de inestabilidad.	Factor de daño (puntuación).	Tramo 0+000 - 3+000
≤ 25%	Bajo	10	
Entre 25% y 75%	Medio	15	
> 75%	Alto	20	X

El tramo se ubica en las proximidades de la isoyeta 1050 mm, lo cual denota un ambiente biótico medianamente positivo que indica tendencia al crecimiento de la vegetación que frene la actividad de procesos destructivos.

Se determina el porcentaje de daño que define el parámetro precipitación, según la evaluación de las condiciones en la Tabla 3.

Tabla 27. Determinación del porcentaje de daño, parámetro precipitación. Tramo 0+000 - 3+000.

Parámetro: Precipitación				Tramo 0+000 - 3+000
Condiciones a evaluar	Referencia	Máximo % por condición	% de daño	% de daño
Estaciones meteorológicas próximas a la zona de estudio.	≤ 4	25%	10% - 25%	
	> 4		0% - 5%	2
Años de registro de precipitaciones medias anuales.	≤ 20	25%	10% - 25%	
	> 20		0% - 5%	2
¿Incentiva la precipitación y la humedad de la zona, la meteorización de las rocas del tramo de vía analizado?	Si	25%	15% - 25%	
	No		0% - 5%	5
La precipitación de la zona ¿favorece la activación de procesos degradacionales?	Si	25%	10% - 25%	15
	No		0% - 5%	
			Σ % de daño	24

La existencia de seis estaciones meteorológicas próximas a la zona de estudio y una data de precipitación superior a 20 años de registro permite asignar porcentajes de daño mínimos de 2% en cada condición. Una precipitación de aproximadamente 900 mm de agua anual permite asignar un 15% de daño al tramo.

Con 24% de daño registrado en la Tabla 27 se ingresa a la Tabla 11. Se obtiene una categoría de alto grado de inestabilidad con la asignación de 10 puntos.

Tabla 28. Determinación de categoría - factor de daño, parámetro precipitación. Tramo 0+000 - 3+000.

% de daño	Categoría. En función al grado de inestabilidad.	Factor de daño (puntuación).	Tramo 0+000 - 3+000
≤ 25%	Bajo	10	X
Entre 25% y 75%	Medio	15	
> 75%	Alto	20	

Caracterización del tramo 0+000 – 3+000.

Una vez definida la categoría de cada parámetro de evaluación se procede a realizar un promedio aritmético de las puntuaciones correspondientes y determinar así el grado de inestabilidad del tramo comprendido entre las progresivas 0+000 y 3+000.

Tabla 29. Promedio de la puntuación de los parámetros evaluados.

Parámetro evaluado	Puntuación
Drenaje	20
Pendiente	10
Litología	15
Estructuras geológicas	10
Procesos geomorfológicos	20
Unidades geomorfológicas	15
Vegetación	20
Precipitación	10
Prom. Aritmético	15

Con la puntuación promedio se ingresa a la Tabla 12 y se obtiene el grado de inestabilidad del tramo. Es para este caso: Grado medio de inestabilidad.

Dicha información también se puede expresar en términos de grados de inestabilidad. Cómo se presenta en la Tabla 30.

Tabla 30. Tabla resumen. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 0+000 – 3+000

FACTOR DE INTERPRETACIÓN	GRADO DE INESTABILIDAD
Drenaje	Alto
Pendiente	Bajo
Litología	Medio
Estructuras geológicas	Bajo
Procesos geomorfológicos	Medio
Unidades geomorfológicas	Medio
Vegetación	Alto
Precipitación	Bajo

Una vez correlacionados todos los factores de interpretación se concluye que el tramo comprendido entre las progresivas 0+000 y 3+000 posee un grado de inestabilidad medio.

El procedimiento descrito para éste tramo es el aplicado para el resto de tramos analizados en el ejemplo de aplicación La Victoria – El Vigía. Se muestran para efectos de análisis las tablas resumen.

Progresivas 3+000 – 6+000

El drenaje como parámetro de evaluación en este tramo se caracteriza por la existencia de numerosos afluentes que desembocan en el río Chama. En las progresivas 3+750, 4+000 y 5+250 la vía intersecta los mismos, destacando que entre las progresivas 4+380 y 4+750 el agua que drena desde la ladera se infiltra en la calzada inestabilizando la estructura del pavimento, generando la fractura, hundimiento y desplazamiento vertical del pavimento; situación interpretada con los sensores remotos y corroborada en sitio. Condiciones éstas que definen una zona medianamente inestable.



Figura 38. Progresiva 4+400. Afectación de la estructura de pavimento. Presencia de humedad.



Figura 39. Progresiva 4+650. Grieta en pantalla de muro armado.

En esta progresiva de la vía en el borde interno hacia el talud de corte se ubica un muro de contención de 32 metros de largo con falla estructural, y con tendencia a volcar, ya que el empuje generado por la acumulación de material deslizado desde el talud y la falta de drenajes ha originado su colapso.

El factor de interpretación basado en la pendiente topográfica permite establecer que los grados de inclinación de las laderas en este segmento se ubican entre los 21° y 80°, ante tal variación debe tenerse especial atención en las vertientes de máxima inclinación, ubicadas entre las progresivas 4+000 y 5+000 que por efectos de la gravedad y su ubicación en media ladera puede generar fenómenos desestabilizadores en la calzada.

Rocas metamórficas representativas de la formación Tostosa, como filitas y pizarras de medio y bajo grado de metamorfismo afloran en las proximidades de la progresiva 4+300,000 donde se muestran cambios locales, con variación de espesores y donde la orientación de las estructuras determina la estabilidad de la vía, obteniéndose respuestas de mediana estabilidad.

Las estructuras geológicas identificadas en este tramo están representadas por los rumbos y buzamientos interpretados de la foliación, característicos de las rocas metamórficas de la formación Tostosa con alto grado de inclinación desde la cabecera del drenaje principal hasta la vía entre las progresivas 4+000 y 5+500 y de bajo grado de inclinación desde la vía hasta el río Chama entre las progresivas 4+000 y 4+750. En la progresiva 5+250 se ubica una falla que controla la orientación del río Chama y donde la vía se funda sobre un zanjón; elementos que a lo largo de este tramo crean condiciones poco favorables para la inestabilidad, ya que la estructura mencionada cuando se desplazó en el pasado dejó tras de sí las rocas fracturadas a ambos lados de su eje.



Figura 40. Progresiva 3+075. Formación Tostosa. Medición de ángulos de Rumbo y Buzamiento.

$$R = N22^{\circ}W; B = 32^{\circ}$$

La resistencia que ofrecen las rocas que integran la formación Tostosa a los procesos de meteorización es el factor que permite mantener cierto control en la generación de procesos degradacionales. En las proximidades a la progresiva 4+000 se diagnostican procesos geomorfológicos en condición inactiva como regueras y

cárcavas, generando ambientes potenciales para la inestabilidad hacia ambos lados de la calzada, ya que al estar presentes y en momentos de periodos lluviosos excepcionales los mismos pueden reactivarse. Una condición insegura, identificada a través de los sensores remotos y corroborada en sitio, está representada por la existencia de cárcavas activas como procesos degradacionales en la progresiva 4+700 lo cual incentiva el tránsito de materiales desde el talud de corte hasta la calzada.

Estableciendo una comparación con el factor vegetación, se obtiene que un área aproximada de 82 Ha presenta un tipo de vegetación mixta hasta la progresiva 4+690 donde la erosión del suelo se mitiga medianamente, a partir de la progresiva 4+690 hacia el talud de corte se desarrolla una vegetación boscosa de 85 Ha que brinda alta protección al suelo a los procesos erosivos y hacia la ladera del rio Chama en 84 Ha aproximadamente la vegetación se presenta en parcelas de cultivo que permiten la exposición directa del suelo a dichos procesos.

Las precipitaciones comprendidas entre 1000 mm y 1050 mm obtenidas a través de la interpretación de las isoyetas favorecen el desarrollo de la vegetación que frena procesos sobre el suelo, determinando un ambiente propicio para la estabilidad.

Caracterización del tramo 3+000 – 6+000:

Tabla 31. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 3+000 – 6+000

Parámetro evaluado	Puntuación
Drenaje	15
Pendiente	20
Litología	15
Estructuras geológicas	15
Procesos geomorfológicos	20
Vegetación	15
Precipitación	10
Prom. Aritmético	15.71

El análisis de los factores de interpretación permite establecer que la elevada pendiente topográfica, la definición de ángulos de rumbo - buzamiento de alto grado

de inclinación y la existencia de un denso drenaje inciden directamente en la activación de procesos geomorfológicos degradacionales, que gracias al bajo grado de metamorfismo de las rocas y a una precipitación que promueve el desarrollo de una vegetación de bosque, se generan condiciones media de inestabilidad en el tramo.

Progresivas 6+000 – 9+000

Este tramo señala red de drenaje de baja densidad y como quiera que la misma es utilizada por los procesos degradacionales lineales, su presencia disminuye favoreciendo condiciones de estabilidad desde y hacia la calzada; sin embargo, en la progresiva 6+450 la carretera fundada a media ladera, presenta problemas de hundimiento y deformación de la carpeta asfáltica, ya que se encuentra desprovista de obras de drenaje.



Figura 41. Progresiva 6+450. Falla de borde.



Figura 42. Progresiva 9+000 Falla de borde. Deformación de calzada.

Los grados de inclinación de las laderas permiten establecer como factor de interpretación de la pendiente topográfica valores de inclinación que oscilan entre 9° y 37° , lo cual favorece la estabilidad de la vía, ya que la fuerza de gravedad no actúa negativamente sobre los taludes de corte ni zonas de relleno o media ladera.

La litología está representada por dos formaciones geológicas y el factor de interpretación permite diferenciar la estabilidad de la vía en función de la formación donde se funda y el tipo de rocas que la compone. En la progresiva 8+350 se ubica el contacto entre las formaciones Tostosa y Colón. La existencia de filitas y pizarras desde la progresiva 0+000 hasta 8+350 representativas de la Formación Tostosa le brindan un comportamiento más estable a la calzada en comparación al hecho que sea fundada entre las progresivas 8+350 y 9+000 sobre la Formación Colón donde las rocas que la componen son las lutitas, calizas y limolitas que presentan mayor tendencia a la inestabilidad.

Las estructuras geológicas que gobiernan el comportamiento de la carretera en este tramo se definen por la existencia de un contacto formacional próximo a la progresiva 8+300; también se identifican desde la progresiva 6+000 hasta 8+300 rumbos y buzamientos interpretados de la foliación de alto y medio grado de inclinación cuya orientación favorece el corte en taludes. Luego y hasta la progresiva 9+000 se interpretan rumbos y buzamientos de la estratificación de alto y bajo grado de inclinación cuya orientación no genera una condición inestable en los taludes de corte.



Figura 43. Progresiva 6+450. Afloramiento sobre el que se midieron los ángulos de rumbo y buzamiento de la foliación. $R= S11^{\circ}W$; $B=40^{\circ}$



Figura 44. Progresiva 8+800. Afloramiento sobre el que se midieron los ángulos de rumbo y buzamiento de la foliación. $R= S65^{\circ}W$; $B=20^{\circ}$

Los procesos geomorfológicos degradacionales de carácter inactivo como masas deslizadas y regueras sobre los cuales se funda la vía en las progresivas 8+450, 8+700 y 8+800 evidencian la relación directa de este factor y el grado de meteorización de las rocas que integran la formación Colón generando una potencial amenaza para la estabilidad de la carretera, aunado a los procesos degradacionales activos como por ejemplo las cárcavas de la progresiva 8+800 que rigen el aporte constante de material hacia la calzada.

Correlacionando el factor vegetación se ha presentado un ambiente biótico favorable según lo interpretado en la imagen satelital entre las progresivas 8+250 y 9+000, luego de la activación de procesos degradacionales de gran magnitud interpretados en las fotografías aéreas de la misión 010451 que afectaron la estabilidad de la vía. Se tiene así una evaluación secuencial utilizando ambos sensores donde se señalan condiciones de restitución de estabilidad. Para el presente satelital (2016) se identifican 390 Ha de vegetación mixta, 46 Ha de bosque y 185 Ha de parcelas de cultivo, desarrollándose una protección media a los impactos de erosión que generan los diversos agentes sobre el suelo.

La precipitación de la zona en función de la interpretación de las isoyetas se ubica entre 925mm y 1000 mm dicha variación genera mediana estabilidad sobre la vía, la cual se ve representada por los procesos geomorfológicos que ahí se desarrollan.

Caracterización del tramo 6+000 – 9+000:

Tabla 32. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 6+000 – 9+000

Parámetro evaluado	Puntuación
Drenaje	10
Pendiente	20
Litología	15
Estructuras geológicas	10
Procesos geomorfológicos	20
Vegetación	15
Precipitación	15
Prom. Aritmético	15

La correlación de los factores de interpretación define que la estabilidad media presente en el tramo, influye directamente en la aparición de procesos geomorfológicos degradacionales de alta inestabilidad, aunque las condiciones de drenaje favorecen la no activación de los mismos, de igual manera, a pesar de la elevada pendiente topográfica los ángulos de rumbo y buzamiento interpretados, favorecen la estabilidad de los taludes de corte, permitiendo establecer un grado de inestabilidad medio.

Progresivas 9+000 – 12+000

En este tramo, dentro del cual un sector del mismo se encuentra emplazado muy cerca de la divisoria de aguas entre las cuencas de los ríos Chama y Onia, la red de drenaje es poco densa, siendo representativa para el análisis del factor drenaje la quebrada la Granzonera, ubicada en la progresiva 10+460 y un cauce secundario en la progresiva 10+630; ambos con aporte considerable de detritos que generan colapso

en su intersección con la calzada, al registrarse crecidas por precipitaciones torrenciales.



Figura 45. Progresiva 10+460. Quebrada La Granzonera. Aporte de detritos. Colmatación de torrenteras.



Figura 46. Progresiva 10+460. Quebrada La Granzonera. Interrupción del 60% de la calzada por material fino aportado por la misma.

La pendiente topográfica de las laderas entre las progresivas 9+000 y 10+750 oscila entre 15° y 37° , por ubicarse en la cercanía de la divisoria de aguas, incrementándose entre las progresivas 10+750 y 12+000 a un rango entre 45° y 80° a medida que descenden las cotas de la vía; generándose mayor condición de inestabilidad en el intervalo con pendientes de mayor grado de inclinación, ya que la fuerza de gravedad favorece la activación de procesos degradacionales, especialmente si el contenido de humedad del suelo es elevado.

El tramo se funda sobre afloramiento rocoso de la formación Palmar representada por areniscas, lutitas y conglomerados, aspecto que permite hallar durante la interrelación del factor litología variaciones de respuestas en cuanto a estabilidad. Los detritos que transporta la quebrada La Granzonera están compuestos por rocas de las formaciones Palmar y Tostosa, como arenisca de grano fino, ya que en la ladera aguas arriba entre las progresivas 9+500 y 10+750 se ubica el contacto formacional.

Respecto al factor que rige el análisis de las estructuras geológicas, se identificó en el mapa geológico en la progresiva 9+000 el contacto de falla entre las Formaciones Colón y Palmar, siendo la formación Colón la más antigua, que respecto a la Formación Palmar presenta más estabilidad por estar sus rocas más consolidadas a pesar de contener lutitas con mayor propiedades de incompetencia que la arenisca de la formación Palmar la cual ocurre bastante friable por encontrarse menos consolidada debido a que es más reciente.

A partir de la progresiva 10+250 se determinaron los rumbos y buzamientos interpretados de la estratificación, característicos de rocas sedimentarias, con un grado alto de inclinación entre las progresivas 10+000 y 10+900 cuya orientación generalizada cambia en las proximidades de la progresiva 11+000 por la existencia de un eje sinclinal, cuyo flanco se desarrolla hasta la progresiva 11+600 con buzamientos de grado medio de inclinación, para dar origen en la progresiva 12+000 a un eje anticlinal.

La existencia de tres trazos de posible falla en un recorrido aproximado de 500 metros, ubicadas en las progresivas 11+630, 11+850 y 12+000, así como un lineamiento no diferenciado en la progresiva 11+960 son las estructuras fotointerpretadas y observadas en campo. Este conjunto de estructuras sobre las cuales se funda la vía, generan condiciones de inestabilidad tanto para el comportamiento estructural del pavimento como para las laderas sobre las cuales se funda.



Figura 47 Progresiva 10+460. Medición de ángulos de Rumbo y buzamiento. $R= S14^{\circ}E$; $B=25^{\circ}$



Figura 48 Progresiva 11+900. Medición de ángulos de Rumbo y buzamiento. Anticlinal

Lado derecho: Ángulos de Rumbo y Buzamiento: $R= S75^{\circ}W$; $B=5^{\circ}$

Lado Izquierdo: Ángulos de Rumbo y Buzamiento: $R= N58^{\circ}E$; $B=25^{\circ}$

El comportamiento estructural de este tramo mantiene relación directa con los procesos geomorfológicos que aquí se desarrollan, los cuales a su vez se catalogan como procesos degradacionales activos e inactivos. En la condición inactiva entre las progresivas 9+000 y 9+350 se presentan masas deslizadas y entre las progresivas 10+380 - 11+850 se destacan regueras activas y paleomasas deslizadas de diferentes tiempos de depositación, estando la vía fundada sobre estas últimas en las progresivas 10+620, 11+380 y 11+500 siendo zonas potencialmente inestables. Mientras que en la condición activa se encuentran operando un conjunto considerable de cárcavas y

regueras, que aportan continuamente materiales a la calzada, producto del deslizamiento.

A través del factor vegetación se puede discriminar aquella que está presente en aproximadamente 780 Ha como vegetación mixta y 120 Ha como bosque, representando dicha proporción una protección media al suelo a los efectos de la erosión.

En este tramo se registran las menores precipitaciones anuales, y a través de la interpretación de las isoyetas se definen valores que oscilan entre 850 mm y 950 mm situación favorable para la estabilidad de la carretera, ya que se mitigan los procesos de meteorización, erosión, y transporte de material desprendido y activación de procesos geomorfológicos degradacionales. .

Cabe destacar que como la imagen satelital presentó gran nubosidad entre las progresivas 9+750 y 10+750, toda la información suministrada de este intervalo se obtuvo a través de las fotografías aéreas y trabajo de campo.

www.bdigital.ula.ve

Caracterización del tramo 9+000 – 12+000:

Tabla 33. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 9+000 – 12+000

Parámetro evaluado	Puntuación
Drenaje	15
Pendiente	15
Litología	20
Estructuras geológicas	20
Procesos geomorfológicos	20
Vegetación	15
Precipitación	10
Prom. Aritmético	16.43

La diversidad existente en cambios de orientación e inclinación de las capas que allí afloran y las diferentes estructuras geológicas presentes en el tramo, aunadas a una litología caracterizada por bloques de arenisca y lutitas medianamente meteorizadas, con un clima definido por precipitaciones entre 850 mm y 950 mm incentivan la generación de procesos degradacionales que influyen negativamente en la estabilidad de la vía. Se determina por ello un grado de inestabilidad medio.

Progresivas 12+000 – 15+500

De la longitud total del tramo analizado, aproximadamente 1 Km de vía fue fundada muy próxima a la divisoria de agua, motivo por el cual son pocos los cauces que se intersectan. Desde la progresiva 12+000 hasta la 13+500 el drenaje se orienta hacia el río Chama, y a partir de la 13+500 hasta la 15+000 el mismo se desplaza hacia el río Ónia, La vía intersecta un cauce en las proximidades de la progresiva 14+500 y en sitio se constató la existencia de una alcantarilla como obra de paso. En general el factor drenaje genera altas condiciones de estabilidad en la vía.

La pendiente topográfica oscila entre 26° y 37° de inclinación factor que al ser evaluado no determina inestabilidad para la vía por sí solo.

La litología como parámetro de interpretación permite ubicar el tramo en análisis sobre la formación Palmar, resaltando que desde la progresiva 12+930 hasta la 13+000 la vía se fundó sobre una cuña de la formación Isnotú, que en función a lo interpretado no genera condiciones de inestabilidad. La influencia que ejercen los materiales meteorizados que integran la formación Palmar aportan un grado medio de inestabilidad para el corredor vial.

El factor de interpretación que se genera analizando las estructuras geológicas presentes, se valida con las geoformas, orientaciones e inclinaciones de los planos de la estratificación interpretados. En las progresivas 12+930 y 13+000 el contacto formacional está regido por una falla probada. Los ángulos de rumbo y buzamiento, son de medio y bajo grado de inclinación, manteniendo una orientación generalizada desde la progresiva 12+000 hasta 14+600 favorable al corte, donde un lineamiento

estructural no diferenciado define el eje de un sinclinal, con un flanco que se prolonga hasta la progresiva 15+200 donde la inclinación es de alto grado. Se interpreta la ubicación de un eje sinclinal en la progresiva 15+180 con un flanco hasta la progresiva 15+500 donde se sitúa el contacto formacional Palmar - Isnotú. Esta realidad tanto geológica como geomorfológica, permite establecer una zona potencialmente inestable.



Figura 49. Progresiva 14+300. Formación Palmar. Planos de estratificación. Ángulos de Rumbo y Buzamiento: $R= S30^{\circ}E$; $B=16^{\circ}$

Procesos geomorfológicos degradacionales inactivos tienen significativa importancia en el análisis de este segmento vial, ya que se hacen presentes en la formación Palmar desde la progresiva 12+000 hasta 13+250 donde fueron inventariadas 9 masas deslizadas de forma consecutiva, en su mayoría aguas abajo de la carretera en la vertiente hacia el río Chama lo que puede generar procesos de acción remontante hacia la calzada. Desde la progresiva 14+250 hasta 14+950 las masas deslizadas inactivas se ubican hacia ambos lados de la vía, generando una zona potencialmente inestable. Los procesos degradacionales activos en este tramo están representados por cárcavas próximas a la progresiva 12+500 que aportan cantidades significativas de detritos a la calzada; lo que motivó la construcción de una pantalla atirantada en el talud corte.

El desarrollo de una vegetación boscosa con cobertura de unas 390 Ha, vegetación mixta con 80 Ha y un área de parcela de cultivo con 60 Ha, permite concluir que el tramo en análisis es poco vulnerable a procesos de erosión que pueden afectar la estabilidad de la vía, dada la alta densidad de cobertura de la comunidad vegetal más protectora.

Con relación al factor de precipitación, las isoyetas en el área de estudio, permiten determinar para la progresiva 12+000 una precipitación de 900 mm y para la progresiva 15+000 una media de 950 mm; rango que contribuye a incentivar los procesos de meteorización de la rocas, a excepción de las áreas bajo cultivo donde el agua de escorrentía ve facilitado su trabajo erosivo.

Caracterización del tramo 12+000 – 15+500:

Tabla.34 Correlación de factores de interpretación. Progresivas 12+000 – 15+000

Parámetro evaluado	Puntuación
Drenaje	10
Pendiente	10
Litología	15
Estructuras geológicas	20
Procesos geomorfológicos	20
Vegetación	10
Precipitación	15
Prom. Aritmético	14.28

El aporte positivo en cuanto a estabilidad que brindan los factores drenaje, pendiente y precipitación, permite compensar la influencia negativa que ejercen las estructuras geológicas en la activación de los procesos degradacionales que pueden afectar la estabilidad global, razón por la cual el tramo está caracterizado por un grado de inestabilidad medio.

Progresivas 15+500 – 18+000

El drenaje de las laderas se realiza hacia la cuenca del río Ónia. La vía intersecta cauces en las progresivas 15+320, 15+500, 15+920, 16+220 y 16+750 por medio de alcantarillas. Por ejemplo y mediante interpretación satelital en la progresiva 16+220 se visualiza una obra de paso. El tramo existente entre las progresivas 17+000 y

18+000 presenta nubosidad en la imagen satelital, motivo por el cual se tomó en cuenta solo la fotointerpretación y trabajo de campo. La densa red de drenaje permiten asignarle al factor una influencia significativa en la inestabilidad de la vía.



Figura 50. Progresiva 16+220. Condiciones de la boca de salida de alcantarilla

El factor pendiente se mantiene constante entre las progresivas 15+000 y 16+000 con pendientes que oscilan entre 32° y 37° , posteriormente dicha inclinación en laderas desciende a un rango comprendido entre 15° y 32° hasta la progresiva 17+700 a partir de la cual se desarrollan inclinaciones entre 9° y 15° por ubicarse en la divisoria de agua; estas características de relieve favorecen la estabilidad de la vía.

Los sedimentos característicos de la formación Isnotú predominantemente lutíticos, con numerosas areniscas intercaladas y capas subordinadas de carbón y conglomerado se muestran con medios espesores donde la orientación de sus estructuras pasa a ser un elemento clave para la estabilidad de la vía. Se señalan entonces signos de baja estabilidad por el alto grado de meteorización a las que están sujetas las rocas.

El factor de evaluación relacionado con las estructuras geológicas permite interpretar en la zona de contacto formacional entre las formaciones Isnotú y Palmar en la progresiva 15+500, un eje anticlinal el cual es intersectado por la vía, donde

cambia nuevamente la orientación de los planos y los ángulos de buzamiento hacia ángulos de medio y bajo grado, donde la orientación del buzamiento resulta desfavorable al corte entre las progresivas 16+400 y 17+500.

Entre las progresivas 16+420 y 16+700, paralelas al talud interno de la vía se visualizan dos ejes de fallas probables que se intersectan entre ellos. En la progresiva 16+750 se ubica una falla probada. Todo este estado de cosas señala condiciones medias de inestabilidad con potencial hacia alta inestabilidad dados los escenarios geológicos y geomorfológicos presentes.



Figura 51. Progresiva 15+750. Rocas sedimentarias donde se visualizan los planos de estratificación. Ángulos de Rumbo y Buzamiento: $R= S19^{\circ}E$; $B=12^{\circ}$

En lo que respecta a los procesos geomorfológicos degradacionales como parámetro de evaluación, se destaca la existencia de numerosas paleomasas deslizadas en condición inactiva en las proximidades de la calzada entre las progresivas 16+250 y 16+750. En la progresiva 16+250 dicha inactividad es precaria, puesto que las condiciones actuales de la vía permiten concluir que en la zona hubo y continua en menor grado un movimiento de masa, evidenciándose restos de un proceso aguas arriba que incide aguas abajo, generando falla de borde, desnivel en la calzada y agrietamiento del pavimento; razón por la cual se construyó un muro de gaviones de 2 metros de profundidad.

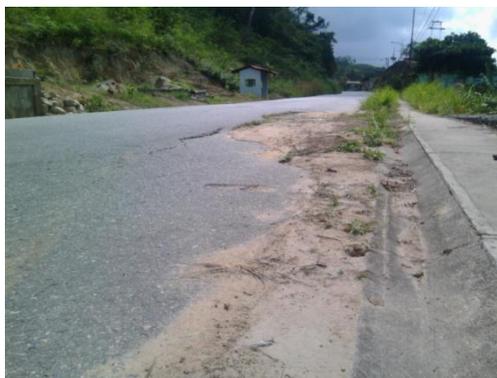


Figura 52. Progresiva 16+250. Falla de borde, por desplazamiento de terreno.

A lo largo de este tramo se diagnostican cárcavas inactivas de hasta 200 metros de longitud que son intersectadas por la vía en las progresivas 17+000 y 17+500. Las características señaladas denotan un contexto desfavorable para la estabilidad de la carretera.

La vegetación se distribuye de manera mixta con 360 Ha, bosque con 410 Ha y sin recubrimiento una cobertura de 5 Ha, reflejando altas condiciones de protección al suelo y por ende al poco desarrollo de procesos erosivos.

Las isoyetas se presentan en un intervalo entre 950 mm y 1050 mm, lo cual y teniendo en cuenta que las temperaturas van ascendiendo a medida que se desciende topográficamente, se intuye que van apareciendo progresivamente condiciones de mayor alteración teniendo en cuenta que se está en terrenos de las rocas de la formación Isnotú, sobre las cuales se encuentra fundada la carretera.

Caracterización del tramo 15+500 – 18+000:

Tabla 35. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 15+000 – 18+000

Parámetro evaluado	Puntuación
Drenaje	20
Pendiente	10
Litología	20
Estructuras geológicas	15
Procesos geomorfológicos	15
Vegetación	10
Precipitación	10
Prom. Aritmético	14.28

La correlación de los factores de evaluación permite determinar una zona potencialmente inestable, ya que para el momento se encuentran en condición inactiva un inventario denso de procesos geomorfológicos. Ubicando el tramo en un grado medio de inestabilidad.

Progresivas 18+000 – 21+000

Entre las progresivas 18+000 y 19+500 la carretera se ubica muy próxima a la divisoria de agua en la ladera de la cuenca del río Chama. La calzada intercepta cursos de agua en las progresivas 18+620, 19+950 y 20+780; tales aseveraciones señalan condiciones de baja inestabilidad. No se visualizaron en las fotografías aéreas e imagen satelital los tipos de obras de paso dispuestos para salvar dichos desniveles.

Las pendientes topográficas en los laterales de la vía, oscilan entre 9° y 32°, pero próximas al río Chama se incrementan en rangos de 45° y 80° situación que favorece procesos degradacionales como el que ocurre en el Sector La Trujillana, donde los deslizamientos evolucionan en erosión remontante pudiendo en el futuro alterar las condiciones actuales de la estabilidad de la vía.

La litología se identifica con la presencia de lutitas y areniscas altamente meteorizadas que generan baja estabilidad, a su vez definen rumbos y buzamientos de mediano a bajo ángulo, cuya orientación coincide con la inclinación de las laderas entre las progresivas 20+250 y 20+600, lo cual favorece el corte con taludes estables.

En el intervalo de las progresivas 18+750 y 19+750 el eje de la vía coincide con lineamiento estructural no diferenciado, cuya actividad se presume pudiera incidir en la generación de procesos por lo cual pudiera pensarse en que este aspecto no representa actualmente factor de inestabilidad para la carretera.

A la altura de la progresiva 18+400 el corredor vial intersecta falla geológica, sitio en el cual pudieran ocurrir a futuro problemas en la calzada; este mismo eje estructural está afectando también la carretera L008 (Rafael Caldera)

Los procesos geomorfológicos degradacionales que se hacen presentes en este tramo están representados por masas deslizadas, cárcavas y regueras inactivas, así

como también, circos de desprendimiento y cárcavas activas. En las progresivas 18+500, 18+750 y 20+500 la vía se funda sobre masas deslizadas, particularmente en la progresiva 18+750 la masa consta de capas de diferentes tiempos de depositación, creando una condición altamente inestable. Entre las progresivas 18+750 y 19+750 se conjugan la presencia de masas deslizadas, circos de desprendimiento y cárcavas inactivas y activas, generando una zona de potencial inestabilidad. A través de la fotointerpretación se determinó que las zonas con gran probabilidad de aparición de regueras y cárcavas esta entre las progresivas 19+850 y 20+250.

No existe cobertura vegetal entre las progresivas 18+000 y 19+230 en las laderas próximas a la vía, producto del asentamiento de la población en un área aproximada de 46 Ha en el sector La Palmita, considerando a la vez que 195 Ha del área en estudio corresponden a bosques y 120 Ha a vegetación mixta, mitigando estas dos últimas los procesos erosivos del suelo, sin embargo la estabilidad de la vía depende directamente de los efectos de la erosión en los taludes adyacentes, donde el agua de escorrentía y aguas subterráneas juegan un papel determinante.

Las isoyetas permiten determinar un incremento de precipitación de 200 mm a lo largo de estos 3 Km de trayectoria, siendo la precipitación en la progresiva 18+000 de 1050 mm y en la progresiva 21+000 de 1250 mm, incremento sustancial el cual contribuye al desarrollo de la vegetación, aceleración del proceso de meteorización y por ende a la activación de procesos geomorfológicos degradacionales hasta el momento inactivos pero de magnitudes considerables.

Caracterización del tramo 18+000 – 21+000:

Tabla 36. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 18+000 – 21+000

Parámetro evaluado	Puntuación
Drenaje	10
Pendiente	10
Litología	20
Estructuras geológicas	10
Procesos geomorfológicos	20
Vegetación	15
Precipitación	20
Prom. Aritmético	15

La correlación de los factores que caracterizan el tramo vial permite asignarle un grado de inestabilidad medio.

Progresivas 21+000 – 24+000

La escorrentía de las laderas se orienta hacia el río Chama. En la progresiva 22+130 se sitúa una alcantarilla y en la 23+090 intercepta un cauce estacionario, en cuyo borde interno se ubica un muro de concreto armado que contiene el material transportado por el mismo, la existencia del muro es confirmada en sitio ya que la resolución espacial y espectral de la imagen satelital y de las fotografías aéreas no permiten su identificación. Se asigna entonces un grado medio de inestabilidad en lo que a drenaje se refiere.



Figura 53. Progresiva 23+090. Cauce estacionario.



Figura 54. Progresiva 23+090. Muro armado para contención de detritos.

La pendiente del área próxima al tramo analizado oscila entre 9° y 32° de inclinación, lo cual no genera condiciones de inestabilidad para la calzada.

Su fundación ocurre sobre estratos de arenisca y lutita intercalados, altamente meteorizados de la formación Isnotú, cuya alternancia origina diferencias de comportamiento en las laderas respecto a la carretera, definiendo diversos grados de estabilidad. Morfológicamente se compone de un conjunto de franjas, salientes con aristas constituidas por estratos de areniscas, y franjas entrantes con depresiones de lutita principalmente y limolita, que al ser degradadas originan zanjonos. En sitio no se distinguen patrones estructurales debido a que las rocas se encuentran parcialmente sepultadas por material en tránsito.



Figura 55. Progresiva 23+780 material sedimentario desprendido interrumpiendo la calzada.

Las estructuras geológicas analizadas están representadas por los ángulos altos y medios de buzamiento interpretados, cuyos grados de inclinación y entre las progresivas 22+250 y 24+000 poseen la misma orientación que la pendiente topográfica, favoreciendo la inestabilidad de los taludes de corte y de la ladera misma. En las progresivas 21+750, 22+250 y entre la 23+000 y 23+750 se interpretan lineamientos estructurales no diferenciados que rigen la geometría de la vía, tal como ocurre en la progresiva 23+500; de igual manera, en la 23+220 la carretera se emplaza sobre la traza de una falla lo cual favorece su inestabilidad.

La incidencia de los procesos geomorfológicos degradacionales en la estabilidad de la vía está directamente relacionada con la ubicación de masas deslizadas, cárcavas y regueras activas e inactivas sobre los cuales se funda. Desde la progresiva 23+750

hasta la 23+950 se mantienen activos una masa deslizada con una superficie de 10 Ha aproximadamente y su respectivo circo de desprendimiento así como regueras de hasta 50 metros de longitud, las cuales aportan a la calzada materiales de diversos diámetros.. En las progresivas 21+800, 22+000, 22+100 y 23+410 ocurre intersección con masas deslizadas inactivas. Entre las progresivas 21+600 - 22+250 y 23+000 – 24+000 se observan cárcavas y regueras inactivas en ambos lados de la calzada, que generan una condición de inestabilidad potencial, ya que refleja el alto grado de meteorización de la roca.

La vegetación que se desarrolla mantiene relación directa con la alternancia de estratos, donde y en las aristas de arenisca salientes es herbácea y en los zanjones de lutita se desarrolla gramínea densa combinada con vegetación arbustiva y sembradíos que aprovechan el mayor desarrollo de los suelos en esos estratos. Se logró definir un tipo de vegetación mixta de aproximadamente 490 Ha, con un área sin vegetación producto de deslizamientos de 10 Ha, generándose así una condición media de inestabilidad.

La precipitación interviene directamente en los procesos desestabilizadores de la vía, ya que promueve, junto a las altas temperaturas, la meteorización de las rocas presentes en las laderas, a través de la infiltración del agua por los lineamientos estructurales presentes. Los valores de precipitación oscilan entre 1350 mm y 1500 mm, propios del clima cálido y húmedo de la zona próxima a El Vigía, señalando una zona de vida tropical boscosa que incide en una alta meteorización de las rocas.

Caracterización del tramo 21+000 – 24+000:

Tabla 37. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 21+000 – 24+000

Parámetro evaluado	Puntuación
Drenaje	15
Pendiente	10
Litología	20
Estructuras geológicas	20
Procesos geomorfológicos	20
Vegetación	15
Precipitación	20
Prom. Aritmético	17.14

La litología característica de este tramo bajo la influencia de la dinámica de las estructuras geológicas, los procesos geomorfológicos degradacionales que se hacen presentes y una alta precipitación, sitúan el tramo en un alto grado de inestabilidad. En el que el drenaje y la vegetación hacen un aporte medio de inestabilidad

Progresiva 24+000 – 26+420

El drenaje está definido por quebradas afluentes al río Chama por lo que la vía intercepta cerca del 80% de esos drenajes, dada su ubicación al pie de las laderas y cercana al río, lo cual es indicativo de inestabilidad por la torrencialidad de los mismos durante la estación de invierno. En la progresiva 26+180 se intersecta una quebrada que en cuyo cause se observan de forma directa bloques rocosos de gran dimensión. Cabe destacar que en la imagen satelital no se distingue el puente construido como obra de paso, y en la fotografía aérea para la fecha de captura, dicha obra no había sido instalada.

www.bdigital.ula.ve



Figura 56 Progresiva 2++240. Puente tipo guerra, ancho 3.75 metros, largo 28.00 metros

El factor pendiente del área próxima al tramo analizado oscila entre 9° y 32° de inclinación, porque se encuentra próxima a unidades geomorfológicas. Factor que al ser evaluado no determina inestabilidad para la vía por sí solo.

Desde la progresiva 24+000 hasta 26+180 la carretera se funda sobre la formación Isnotú, manteniendo la ladera un comportamiento inestable en función del

medio y alto grado de meteorización de los estratos de arenisca y lutita que la componen. Desde la progresiva 26+180 hasta la 26+420 la vía se construyó sobre la formación Betijoque compuesta principalmente por rocas areniscas, esquistos y pizarras.

Respecto a las estructuras geológicas entre las progresivas 24+250 y 25+000 se presentan buzamientos de medio grado de inclinación cuya orientación varía en función de los lineamientos estructurales no diferenciados que los gobiernan. Desde la progresiva 25+250 hasta el final de la carretera los ángulos de buzamiento interpretados son de medio y alto grado de inclinación con la misma orientación de los planos que forman las laderas, induciendo a la inestabilidad en los taludes de corte. En la progresiva 26+180 se interpreta y corrobora con la utilización del mapa geológico la existencia de una falla probada en el contacto formacional.

Los procesos geomorfológicos degradacionales definen en este tramo en mayor porcentaje el grado de inestabilidad de la vía, ya que se fotointerpretan masas deslizadas inactivas sobre las cuales se funda la vía, por ejemplo en las progresivas 24+060, 24+250, 24+380, 24+700 y 25+480, así como cárcavas inactivas de 100 metros de longitud en promedio y regueras inactivas de 50 metros. En condición activa se visualiza en la imagen satelital un circo de desprendimiento en la progresiva 24+250 en conjunto con regueras. En la progresiva 25+750 el paso vehicular se ve interrumpido por el material proveniente del circo de desprendimiento y masa deslizada activa depositada sobre una masa inactiva.

Respecto a las unidades geomorfológicas, entre las progresivas 26+050 y 26+130 la fundación ocurre sobre cono de deyección en su parte distal, posiblemente del Holoceno Medio el cual denota suelos medianamente consolidados, luego a continuación entre las progresivas 26+300 y 26+420 la vía afecta el lateral de un cono de deyección posiblemente del Holoceno Reciente en zona de contacto entre el mencionado cono de deyección y el lateral de una terraza aluvial constituyendo una plataforma sedimentaria en un valle, depositada por el río Chama, la cual puede ser socavada, denotando para el momento zona de inestabilidad potencial.

La vegetación establece la relación directa con la alternancia de capas, concluyendo que en las aristas de arenisca salientes es mínima y en los zanjones de lutita se desarrolla gramínea densa; definiéndose un tipo de vegetación mixta de aproximadamente 415 Ha, con un área sin vegetación producto del desprendimiento de material de 3 Ha; generando condiciones medias de inestabilidad por los efectos erosivos del agua sobre el suelo expuesto.

La precipitación registrada en este tramo es la máxima registrada a lo largo de toda la vía en estudio, desde 1475 mm hasta 1650 mm, destacando que el proceso activo más significativo registrado en la progresiva 25+750 coincide con la ubicación de la isoyeta de 1600 mm sobre una masa ya depositada en condición inactiva. Factor de interpretación que tiene influencia determinante en la inestabilidad ya que acelera los procesos erosivos y de meteorización sobre el suelo y las rocas respectivamente.

Caracterización del tramo 24+000 – 26+420:

Tabla 38. Correlación de factores de interpretación. Progresivas 24+000 – 26+420

Parámetro evaluado	Puntuación
Drenaje	20
Pendiente	10
Litología	20
Estructuras geológicas	20
Procesos geomorfológicos	20
Unidades geomorfológicas	15
Vegetación	15
Precipitación	10
Prom. Aritmético	16.25

La interacción de los parámetros definidos permite concluir que un denso drenaje en una litología con componentes meteorizados inestable y estructuras geológicas que influyen negativamente sobre la vía, bajo la acción de precipitaciones elevadas que favorecen la activación de procesos geomorfológicos degradacionales, definen en conjunto un alto grado de inestabilidad para el tramo.

La carretera en estudio finaliza en la progresiva 26+420; en la intersección a desnivel que comunica la palmita con las ciudades de El vigía y Mérida. Las obras de drenaje se encuentran en buen estado, las condiciones de estabilidad son óptimas y los elementos de la sección transversal están operativos.



Figura 57. Progresiva 26+420. Final de la vía a estudiar.

www.bdigital.ula.ve



Figura 58. Progresiva 26+420. Obra de drenaje (cuneta) operativa.

CONCLUSIONES

La extracción e interpretación de información del medio físico relacionada con litología, estructuras geológicas, geomorfología, suelos, vegetación, drenajes, topografía y condiciones climáticas, realizada a fotografías aéreas e imágenes satelitales, como recursos para el análisis de las condiciones físicas de vialidad existente en zonas de montaña, es el fundamento bajo el cual se sustentó la presente investigación, lográndose el desarrollo del “MÉTODO DE EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE ESTABILIDAD DE UNA VÍA EN ZONA DE MONTAÑA A TRAVÉS DE SENSORES REMOTOS”, la cual pasa a ser una herramienta de gran utilidad para abordar los problemas de aplicación de la ingeniería civil en el área de vías, específicamente en los temas relacionados con el mantenimiento vial.

El desarrollo de la metodología conjuga los conocimientos de diversas áreas de gran aplicación tecnológica que analizan el medio para dar solución a los problemas de origen antrópico o los que se deriven de fenómenos naturales, entre las que destacan la teledetección con el empleo de sensores remotos a través de los cuales se realiza el reconocimiento de la superficie terrestre y las variables objeto de estudio, siendo la geomorfología la ciencia que analiza el relieve, su origen y los procesos que en él se desarrollan y la ingeniería civil a través del estudio de la vialidad como infraestructura, con el propósito de acometer los problemas de inestabilidad que estas presentan, mediante la determinación de los factores que inciden en tal comportamiento, motivos estos que permiten señalar que se trata de un trabajo vanguardista, ya que para la fecha el ingeniero encargado de dar tratamiento preventivo y correctivo a vías existentes en zona de montaña, no tiene a su disposición un método que pueda orientarlo en el camino a seguir para detectar los puntos neurálgicos en cuanto a estabilidad se refiere.

El método contempla la capacidad de análisis o habilidad que posea el profesional encargado de su desarrollo para interpretar la información suministrada por los sensores remotos, mapas especializados o información documental, generando factores de interpretación que posteriormente se correlacionan para establecer la máxima influencia que ejercen sobre la determinación del grado de inestabilidad de la carretera en estudio.

La metodología contempla parámetros de evaluación de entrada de tipo cualitativo y cuantitativo, para arrojar resultados de tipo cualitativo, definidos en un rango de categorías de bajo, medio y alto grado de inestabilidad

Las imágenes proporcionadas por el CPDI del satélite Landsat y Sentinel poseen alta nubosidad en varios tramos de la vía, afectando negativamente la interpretación de las mismas. La resolución espacial de la fusión de la imagen del satélite Spot es baja, por lo cual no favorece la interpretación, viéndose superadas estas limitantes en la imagen satelital suministrada por el visor Sasplanet, razón por la cual fue utilizada en el desarrollo del método.

La metodología presenta como herramienta gráfica de resultados para la interpretación un plano zonificado en áreas de bajo, medio y alto grado de inestabilidad, según anexos 10-A y 10-B, a partir del cual el ingeniero encargado del mantenimiento vial puede de forma expedita y acertada aplicar los procedimientos necesarios monitoreando los tramos de acuerdo a su vulnerabilidad, por lo tanto, se confirmó la racionalidad de los parámetros considerados, la metodología, las herramientas y los procedimientos adoptados para desarrollar el mapa de inestabilidad.

La utilización del método por parte del ente competente permite realizar cronogramas de actividades en cuanto a mantenimiento vial se refiere, seleccionando de acuerdo a la actividad que se acometa, la mano de obra y equipos necesarios.

La aplicación del método en la carretera Local 002 permitió ubicar los aspectos potencialmente inestables que permiten asignarle un tratamiento preventivo y

correctivo, según el caso, tomando en consideración las progresivas destacadas en la caracterización de cada tramo. El ingeniero encargado del mantenimiento debe priorizar de acuerdo a la información suministrada en este trabajo de grado las áreas a ser abordadas, estableciendo para ello un cronograma de trabajo. Con los resultados obtenidos el ente encargado del funcionamiento puede crear un plan estratégico para monitorear y acometer cualquier urgencia durante la temporada de invierno, ya que se conocen las progresivas donde podrían activarse procesos geomorfológicos de degradaciones que generen el tránsito de materiales sobre la calzada o en el peor de los casos, por acción remontante originen fallas de borde.

Los factores de interpretación definidos y aplicados en el método representaron la herramienta clave para determinar la estabilidad de la vía, donde se evaluó tanto la influencia de cada uno como la interacción del conjunto en cada tramo. Respecto al drenaje la red que lo definió y la gravedad le asignan el carácter de factor desencadenante en los procesos desestabilizadores. La pendiente en función del grado de inclinación de las laderas, la gravedad y fundación de la vía, ejerció influencia significativa en la generación de procesos de degradación, de acción remontante y erosiva que incentivan el tránsito de materiales a través de las cárcavas o regueras activas desde o hacia la calzada. La litología como elemento de interpretación permitió establecer la relación que tienen los materiales de las formaciones geológicas sobre las que se funda la vía con su estabilidad, dependiendo del grado de meteorización de los mismos, la disposición de los estratos o planos según el caso y su exposición al ambiente. El análisis de las estructuras geológicas consideradas en el método, resultantes del desarrollo del relieve por la tectónica de placas, definió lineamientos sobre los que escurren drenajes, facturas generadoras de detritos, ángulos de buzamiento que inciden en el corte, determinándose que punto de la vía quedó fundado sobre algún tipo de estructura que pudiera incidir en cierto grado sobre su estabilidad. Los procesos geomorfológicos de degradación como parámetro de evaluación permitieron definir los procesos pasados, presentes y potenciales que inciden en la estabilidad del corredor vial en función a su interacción con el medio ambiente y las condiciones de drenaje que se generan hacia ambos lados de la vía.

Las Unidades geomorfológicas como resultado de procesos agradacionales identificaron la acumulación de sedimentos con diferente génesis como conos de deyección y terrazas que influyeron en la estabilidad de la vía de acuerdo a su lugar de fundación y a la acción erosiva del cauce que las originó. El análisis de la vegetación como parámetro de evaluación de la estabilidad jugó un importante papel ya que a través del mismo se determinó en función de la densidad de cobertura vegetal la exposición del suelo a los procesos erosivos y su influencia en la activación de procesos degradacionales bien aguas arriba o aguas abajo. El análisis de la precipitación se realizó a través de isoyetas constatándose que en las zonas con mayor precipitación anual, próximas a El Vigía, cuyo clima es húmedo y cálido, se generaron las condiciones de estabilidad más precarias de la vía en estudio, ya que se vieron favorecidas la meteorización de las rocas, la activación de procesos degradaciones y el incremento de la red de drenajes naturales.

Cabe destacar que elementos muy detallados o problemas puntuales no se pudieron observar o determinar con los sensores remotos por la resolución espacial de los recursos utilizados, por ejemplo: presencia o ausencia de cabezales, aceras, brocales, cunetas, presencia o ausencia de diques y torrenteras, tipo de obras de paso, existencia de grietas o desniveles en el pavimento, estado de los muros de contención, entre otros de este tipo.

RECOMENDACIONES

Progresivas 0+000 – 3+000.

Los primeros 3 Km de vialidad ameritan un mantenimiento de carácter preventivo y correctivo, ya que 100 metros de la vía a partir de la progresiva 0+600 se fundan sobre una masa deslizada actualmente inactiva, pero con alto potencial de reactivación; ante tal situación se recomienda realizar drenajes de coronamiento en el talud de corte para evitar que la calzada, fundada en relleno, funcione como un dique que represa aguas.

En la progresiva 0+440 se ubica puente sobre el canal de escorrentía de un torrente activo, motivo por el cual se debe monitorear las fundaciones del mismo para evitar socavación en el caso de cambio de dirección de la corriente. (torreteras)

En la progresiva 1+950 ocurre empuje de la masa de suelo donde la vía intercepta una quebrada, lo cual ha originado falla de borde en el canal externo de circulación, así como también la pérdida de la carpeta de rodamiento, por lo cual deben realizarse las obras de drenaje superficial longitudinales y transversales, con posterior rehabilitación la calzada.

Progresivas 3+000 – 6+000.

La interacción de los factores de interpretación determinó la necesidad de aplicar un tratamiento preventivo que garantice la estabilidad de la vía.

Entre las progresivas 4+400 y 4+700 se encuentra activo el fenómeno de reptación, lo que ha originado ondulación en la calzada, con pérdida de la carpeta asfáltica y desplazamiento vertical; así como la existencia de cárcavas en condición activa siendo necesaria la colocación de obras de drenaje longitudinales y transversales como cunetas de coronación, torreteras o canales que colecten y canalicen el agua de escorrentía que se infiltra, para posteriormente rehabilitar el pavimento afectado.

Progresivas 6+000 – 9+000.

El trabajo de campo determinó que debe aplicarse un tratamiento correctivo en la vía en la progresiva 9+000, ya que presenta deformación de la estructura del pavimento en el canal externo, con grietas longitudinales en el orden de 20 metros y como obra de contención está presente un muro de gaviones que resiste el deslizamiento de la calzada. Ante tal situación se recomienda la construcción de drenajes superficiales y subterráneos que colecten y canalicen el agua del talud de corte, evitando que la vía trabaje como dique. Tal situación no pudo ser determinada con los sensores remotos dado lo puntual del problema y su relación con la resolución de los mismos.

La vía se funda sobre masas deslizadas y regueras inactivas en las progresivas 8+450, 8+700 y 8+800 ameritando la construcción de obras de drenaje a ambos lados de la calzada como medidas de mantenimiento preventivo y un constante monitoreo.

En la progresiva 8+800 la activación de cárcavas genera un punto de conflicto que debe ser acometido.

Progresivas 9+000 – 12+000.

La interacción de los factores de interpretación desarrollados determinan como punto neurálgico de este tramo de carretera la progresiva 10+500 donde se ubica la quebrada la Granzonera y en un radio de acción de 500 metros tienen participación en su estabilidad procesos geomorfológicos activos e inactivos que se rigen por la existencia probada de una falla; deben ser abordados los trabajos relacionados con la construcción de obras de drenaje efectivas aguas arriba, perpendiculares a la dirección del cauce, de amplia capacidad que permitan la retención de detritos durante las crecidas para posteriormente realizar la limpieza y evitar así interrupción de la calzada.

Debe ser monitoreado el tramo desde la progresiva 11+000 hasta 12+000 ya que la activación de cárcavas y regueras en conjunto con la influencia que ejercen los alineamientos no identificados favorecen el desprendimiento de materiales,

recomendándose la colocación de mallas galvanizadas de doble torsión en los taludes de corte para evitar el impacto de los mismos a la calzada.

Progresivas 12+000 – 15+500.

Desde la progresiva 12+000 hasta 13+250 la existencia de un conjunto de paleomasas en su mayoría aguas debajo de la carretera en la vertiente hacia el río Chama pueden generar procesos de acción remontante hacia la calzada, por tal razón se debe evitar el bote de material en dicha zona y tomar las medidas preventivas para evitar las fallas de borde.

Desde la progresiva 14+250 hasta 14+950 las masas deslizadas inactivas se ubican hacia ambos lados de la vía, se recomienda por ende la construcción de obras de drenaje que mantengan bajos los contenidos de humedad de la zona.

Progresivas 15+500 – 18+000.

La vía intersecta cauces por medio de alcantarillas en las progresivas 15+320, 15+500, 15+920, 16+220 y 16+750 se recomienda entonces monitorear las condiciones de entrada y salida de dichas obras para evitar la acumulación de sedimentos y colapso en las mismas. De igual manera se hace necesaria la construcción de torrenteras aguas arriba de la calzada para disipar energía y disminuir la capacidad de arrastre de materiales.

En la progresiva 16+250 la activación de una masa deslizada aguas arriba, genera desprendimiento de material, desnivel en la calzada y agrietamiento del pavimento; situación que amerita la construcción de un sistema de terrazas aguas arriba, incorporando obras de drenaje en ambos lados de la carretera.

Progresivas 18+000 – 21+000.

En las progresivas 18+620, 19+950 y 20+780 la vía intersecta cursos de agua, razón por la cual se deben chequear las condiciones de entrada y salida de las obras de paso, se recomienda la construcción de torrenteras para disipar energía y disminuir la capacidad de arrastre de materiales.

En las progresiva 18+500, 18+750 y 20+500 la vía se funda sobre masa deslizada, ameritando la puesta en funcionamiento de obras de drenaje que permitan controlar los contenidos de humedad de dichos procesos degradacionales.

Progresivas 21+000 – 26+420.

En la progresiva 23+090 la vía intercepta un cauce estacionario, donde se ubica un muro de concreto armado que actúa como dique e impide el transporte de material hacia la calzada. Se recomienda la limpieza de dicho dique ya que se colmató.

Desde la progresiva 23+750 hasta la 24+250 se mantienen activas masas deslizadas con su respectivo circo de desprendimiento que aportan a la calzada bloques de material sedimentario. Se recomienda la ejecución de un sistema de terrazas aguas arriba que estabilice la masa disminuyendo su peso y la pendiente que la gobierna.

Entre las progresivas 21+600 - 22+250 y 23+000 – 24+000 hay presencia significativa de cárcavas y regueras en ambos lados de la calzada, las cuales pueden ser acometidas con la instalación de obras de drenaje y colocación de elementos, como mallas galvanizada de doble torsión, que mitiguen el impacto de materiales sobre la carretera.

En las progresivas 24+380, 24+700 y 25+480 la vía se funda sobre masas deslizadas inactivas, situación que amerita disminuir los contenidos de humedad del suelo, ya sea con la implementación de obras de drenaje o también con medidas de reforestación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaraz, F. (2013). Geobotánica. En F. Alcaraz. España: Creative Commons.
- Arias, F. (2006). *El PROYECTO DE INVESTIGACIÓN*. Caracas: Episteme, C.A.
- Arozarena, A. (1989). TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES. En A. Arozarena, *Aplicaciones de las imágenes espaciales a la cartografía de base, Teledetección y planificación integrada del territorio*. (págs. 215-223). Madrid.
- Avada. (2012). *Ecodyt*. Recuperado el 4 de Febrero de 2018, de <http://www.ecodyt.com/>
- Bueno, A. (2012). *Diseño de técnicas de interrogación y sensores en fibra para el sector de la construcción*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cano, M., & A, Z. (2014). *Manual de fotointerpretación analógica y digital*. Mérida: Centro de publicaciones ULA.
- Carvajal, C. (2002). *El Espectro Electromagnético*.
- Chuvieco. (1990). Fundamentos de Teledetección Espacial. En Chuvieco, *Fundamentos de Teledetección Espacial* (pág. 90).
- Espasa Calpe, S. A. (1998). *Nuevo Diccionario Enciclopédico Espasa*. Barcelona, España: Espasa.
- Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico (FIIIDT). (2017). *Fundación Instituto de Ingeniería para Investigación y Desarrollo Tecnológico*. Recuperado el 16 de Agosto de 2016, de Centro de Procesamiento Digital de Imágenes (CPDI): <http://cpdi.fii.gob.ve/>

- Fundación Wikimedia. (12 de 03 de 2018). *wikipedia*. Recuperado el 15 de 03 de 2018, de wikipedia: https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagnetico
- Geología Venezolana. (10 de Enero de 2011). *Fotointerpretación y sus Fundamentos*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2017, de <http://geologiavenezolana.blogspot.com/2011/01/fotointerpretacion-y-sus-fundamentos.html>
- Gutierrez, J. (2005). *GUÍA TEÓRICA DE FOTOGEOLOGÍA*. Mérida. inameh. (2017). *inameh*. Recuperado el 20 de Octubre de 2017, de <http://www.inameh.gob.ve/web/>
- Jingyu, W., Guoqing, Z., & Zezhong, Z. (9-13 de March de 2009). SURVEY AND ANALYSIS OF LAND SATELLITE REMOTE SENSING APPLIED IN HIGHWAY TRANSPORTATIONS INFRASTRUCTURE ENGINEERING. *ASPRS 2009 Annual Conference*. Maryland.
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2004). *Remote sensing and image interpretation*. New York: Wiley.
- M, L. (1988). *Manual de Fotogeología*.
- Moreno, J., Alonso, F., Gomariz, F., & Alonso, D. (2010). *Análisis y validación de modelos digitales de elevaciones mediante datos LIDAR de la Universidad de Sevilla*. Sevilla.
- Onsrud; Harlan, J; Steven. (1992). *NCGIA Annual GIS Bibliography*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, de <https://escholarship.org/>
- Pacheco, C., & Pozzobon. (2006). *Manual de ejercicios de Laboratorio fotogrametría y fotointerpretación*. Mérida: Publicaciones, Universidad de Los Andes.
- Petroleos de Venezuela, S.A. (PDVSA). (1999). *LEXICO ESTRATIGRAFICO ELECTRONICO DE VENEZUELA*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2016,

de http://bibliogeo.ing.ucv.ve/cgi-win/be_alex.cgi?Acceso=T041500007221/0&Nombrebd=bfiegucv

Rajadurai, K. C. (Febrero de 2015). Highway Alignment using Remote Sensing and Geographical Information System. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1, 228-234.

Ruiz, M., & Guarnizo, G. (2014). *Tecnologías ópticas para la detección del estado de la calzada*. Madrid.

SAS Group. (2007-2015). *SASGIS*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2017, de <http://www.sasgis.org/sasplaneta/>

Shiferaw, A., Tarun, R., & P, K. (2014). Application of Remote Sensing and GIS for Landslide Disaster Management: A Case from Abay Gorge, Gohatsion–Dejen Section, Ethiopia. *Landscape Ecology and Water Management: Proceedings of IGU Rohtak Conference*, 2, 15-32.

Star, J., & Estes, J. (1990). *Geographical Information Systems: An Introduction*. New Jersey.

The Texas University of Austin. (2017). *The Texas University of Austin*. Recuperado el 02 de diciembre de 2017, de The Texas University Libraries: <http://www.lib.utexas.edu/maps/venezuela.html>

Varnes, D. (1978). *Slope movement types and processes*. Washington, D.C.: National Research Council.

Venezuela Tuya. (2017). *Venezuela Tuya*. Recuperado el 05 de diciembre de 2017, de <http://www.venezuelatuya.com/estados/merida.htm>

Verstappen, H. (1977). *REMOTE SENSING IN GEOMORPHOLOGY*. Amsterdam; Oxford; New York; : VIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY.

Weixing, W., Nan, Y., Yi, Z., & Fengping, W. (2016). A review of road extraction from remote. *ScienceDirect*, 271-282.

GLOSARIO

Abanico aluvial: Material detrítico depositado en forma de abanico, por una corriente acuosa, al cambio de pendiente de un torrente, o cercano a su nivel de base. Sinónimo: cono aluvial.

Afloramiento: Todo tipo de roca, mineral (filones, vetas), agua, etc. que se observa en la superficie terrestre. Generalmente las rocas se hallan cubiertas por los materiales descompuestos y el trabajo de campo por la búsqueda de los afloramientos constituye una de las principales tareas de los geólogos.

Afluente: Curso de agua cuyo volumen o descarga contribuye a aumentar el caudal del río, en el cual desemboca, puede tratarse también de un lago, laguna o mar.

Agentes de alteración química: Son los diversos agentes que contribuyen a alterar los minerales de las rocas, transformándolos en nuevos minerales. La alteración puede ser por oxidación, corrosión, hidratación, carbonatación, etc. Los agentes de alteración química son el agua, el hielo, los ácidos. El producto final de la alteración química son los suelos.

Arcilla: Partículas finas, generalmente de silicatos, de dimensiones menores de 1/256 mm. provenientes de la alteración física y química de las rocas y minerales. Los principales tipos de arcilla son: el caolín, la bentonita, la montmorillonita. El valor de las arcillas depende de las propiedades físicas y químicas, de su composición,

Arcosa: Roca sedimentaria (arenisca) compuesta de granos de arena, con predominio de cuarzo, generalmente proviene de la alteración de las rocas graníticas.

Arenisca: Roca sedimentaria clástica, resultado de la consolidación y diagénesis de la acumulación de arena. De acuerdo con el contenido de sus elementos o de su cementante, la arenisca puede denominarse: Arcosa (predominio de partículas de cuarzo), grauwaca (predominio de feldespatos), arenisca arcillosa (cementante arcilla), arenisca limosa (cementante limo), arenisca calcárea (cementante carbonatos).

Pizarra: Roca metamórfica, producto del metamorfismo dinámico regional de las argilitas y lutitas, presenta clivaje lamelar o pizarroso. Se forma en ambientes metamórficos de facies de las pizarras. Se caracteriza por su alta resistencia a los esfuerzos perpendiculares a los planos de exfoliación o clivaje.

Filita: Roca metamórfica producto del metamorfismo intenso de las arcillas y lutitas. Es frecuente encontrar silicatos alumínicos, clorita, sericita, magnetita, estauroлита, pirita, turmalina y otros minerales de metamorfismo. Las filitas se encuentran en las formaciones rocosas antiguas, mayormente paleozoicas y mesozoicas o precambrianas.

Estereoscopía: Visión tridimensional de los objetos ayudados por dos imágenes del mismo objeto desde ángulos diferentes y vistos a través de un estereoscopio.

Estratificación.- Disposición paralela o subparalela que toman las capas de las rocas sedimentarias, durante su sedimentación. La estratificación puede ser concordante, discordante y cruzada.

Estructura anticlinal: Estructura geológica que presenta una serie de rocas estratificadas donde las capas de la secuencia se hallan plegadas y sus ángulos de buzamiento divergen a partir del plano axial

Espectro electromagnético: Comportamiento de las ondas de acuerdo a su longitud de onda y frecuencia. Se debe tener en cuenta que la velocidad de las ondas electromagnéticas es de 300,000 km/seg, por lo que el producto de la longitud de onda por su frecuencia debe ser igual a esta velocidad. Las ondas electromagnéticas son: rayos gamma, rayos X, rayos ultravioletas, campo visible, rayos infrarrojos y

microondas. Los materiales de la superficie terrestre emiten, reflejan, refractan y absorben los rayos del espectro de acuerdo a sus propiedades físicas y químicas, por lo que la ciencia de la percepción remota.

Erosión: Destrucción de los materiales de la corteza terrestre por acción de los procesos geológicos. La erosión implica los siguientes procesos: fracturamiento, fisuramiento, alteración física y/o química hasta el momento de arranque de los materiales, sin considerar el transporte. Los agentes erosivos son: el agua, el viento, el hielo, la acción del sol dilatando las rocas durante el día y contrayéndolas durante la noche, la humedad.

Falla: Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro colindante a éste o de ambos bloques, a través de un plano denominado "plano de falla". Las fallas son producto de esfuerzos tectónicos, producto de la epirogénesis, orogenia, diastrofismo, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de parte de la corteza. Una falla ocasiona discontinuidad de las estructuras geológicas.

Fotogeología: Es la ciencia que estudia la geología de un determinado lugar a partir de las fotografías aéreas. En las fotos aéreas se pueden realizar reconocimientos geológicos, estructurales, litológicos, geomorfológicos, etc. La fotogeología es de suma utilidad para realizar estudios geológicos, sobre todo de aquellas regiones de difícil acceso.

Fotografías aéreas: Son fotos de la superficie terrestre tomadas por aviones especiales y sirven para realizar estudios geológicos, mineros, planeamientos urbanísticos, carreteras. Se tiene fotografías aéreas en blanco y negro y a colores, también se tiene fotos aéreas verticales y oblicuas. Las fotos pueden ser de vuelo alto, que dan escalas pequeñas y de vuelo bajo que dan escalas grandes. Las primeras sirven para realizar estudios regionales y generalizados, las segundas sirven para realizar estudios locales y específicos.

Fotointerpretación: Análisis y estudio de las fotografías aéreas para un determinado fin. Ejm. Fotogeología, interpretación geológica. Fotogeomorfología, interpretación geomorfológica.

Geomorfología: Es la ciencia que estudia las formas del relieve terrestre teniendo en cuenta su origen, naturaleza de las rocas, el clima de la región y las diferentes fuerzas endógenas y exógenas que de modo general entran como factores constructores del paisaje.

Foliación: Propiedad de las rocas metamórficas de presentarse dando la apariencia de hojas, láminas o lamelas. Ejm. las filitas, los micaesquistos.

Flanco: Lado de un morro, de una montaña, de un pliegue, de un sinclinal (flanco de sinclinal), de un anticlinal (flanco de anticlinal), o modo general de cualquier estructura geológica o forma de terreno que posea dos secciones más o menos simétricas a ambos lados de un plano que las divide o las separa.

Sinclinal: Es un tipo de plegamiento en el cual los estratos buzcan en sentido convergente hacia el centro o plano axial. Es un pliegue de tipo cóncavo que generalmente forma una depresión sobre la cual se ubican los valles subsecuentes. Los elementos de un sinclinal son: flanco, plano axial, eje o charnela, rumbo, buzamiento de los estratos, buzamiento del eje o pitch.

Ladera: Término descriptivo usado en geomorfología para designar los terrenos inclinados de una cadena montañosa, o para las pendientes de cualquier tipo de elevación de terreno.

Landsat: Satélite tecnológico terrestre. Land = tierra, Sat = Satélite, lanzado por la NASA-USA con el objeto de obtener imágenes de la superficie terrestre y realizar con éstas estudios de los recursos naturales. Las imágenes pueden ser obtenidas en diversos campos del espectro electromagnético, aprovechando las diferentes propiedades de los materiales y su comportamiento ante cada tipo de onda electromagnética (longitud de onda).

Litología: Ciencia que estudia el origen, evolución y clasificación de las rocas. Se podría considerar como un sinónimo de petrología.

Lutita: Roca formada por la consolidación de partículas muy finas, arcillas. Presenta estructura laminar, muy fina, friable.

Metamórfica (roca): Roca resultante de las transformaciones ocurridas en los minerales y en las rocas mismas, pre-existentes, por acción del proceso de metamorfismo.

Metamorfismo: Es la suma de todos los procesos geológicos mediante los cuales los minerales de las rocas y ellas mismas sufren transformaciones en su estructura, textura y orientación, dando lugar a nuevos minerales y nuevas rocas sin cambiar su composición química. Los agentes principales de metamorfismo son: las presiones litostáticas de las rocas suprayacentes, la temperatura proveniente del gradiente geotérmico y de los procesos magmáticos y las soluciones hidrotermales.

Contacto (litológico): Es una línea que separa las rocas de naturaleza diferente, o dos unidades litológicas. El análisis de los contactos geológicos es de gran importancia para el levantamiento de mapas geológicos, los contactos litológicos determinan además fallas, discordancias, concordancias, yacimientos, vetas mineralizadas.

Drenaje: Es el diseño o trazo efectuado por las aguas de escorrentía o fluviales que modelan el paisaje. Al conjunto de estos diseños o trazos se les denominan "patrones de drenaje". El análisis y estudio de los patrones de drenaje ayuda a la determinación de la naturaleza, estructura y textura de las rocas, así como la tectónica de la región. (fallas, pliegues, etc.)

Terraza: Superficie más o menos plana, horizontal o levemente inclinada, generalmente limitada por dos declives pronunciados. Las terrazas pueden ser terrazas de erosión o terrazas de sedimentación o compuestas. Las terrazas se forman por erosión y/o sedimentación fluvial, marina o lacustre, por lo tanto se les encuentra con frecuencia a lo largo de los ríos, en los bordes de los lagos o en las costas

litorales. Las terrazas se pueden clasificar en: fluviales, marinas, lacustres, glaciares, estructurales, etc.

Procesos geológicos: Son todos los procesos de origen endógenos, exógenos y extratéluricos que modifican la corteza terrestre. De acuerdo a este criterio los procesos se clasifican en: 1) Procesos de origen externo o exógenos, son todos los procesos cuyos agentes se relacionan con la atmósfera y el clima (agentes atmosféricos), agua pluvial, hielo, viento, lagos, mares. Los procesos externos se subdividen en: a.- Denudación (meteorización y erosión), b.- Transporte, y c.- Depósito y sedimentación, 2) Procesos de origen interno o endógenos, son todos los procesos relacionados a las condiciones reinantes en: Movimientos tectónicos (levantamientos y hundimientos de las regiones terrestres y fondos marinos, formación de montañas, isostasia, diastrofismo, etc.). Magmatismo (procesos relacionados con la actividad magmática, intrusión y extrusión) y el metamorfismo (transformación de las rocas pre-existentes en nuevas rocas por acción de la temperatura, presión y actividad de las soluciones hidrotermales), y 3) Procesos extratéluricos, son todos los procesos relacionados con la caída de los meteoritos y materiales extraterrestres.

Estación meteorológica: Lugar destinado a realizar observaciones climatológicas y su influencia con respecto al comportamiento de las lluvias, temperatura, humedad.

Precipitación pluvial: Caída de aguas de la atmósfera por el cambio de temperatura, en forma de lluvia, nieve o granizo.

ANEXOS. CD-ROM

www.bdigital.ula.ve