

TRAZADO DE CARRETERAS MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA

CARLOS MARIO ZULUAGA SANTA

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN
2011

TRAZADO DE CARRETERAS MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA

CARLOS MARIO ZULUAGA SANTA
Código 200610004013
zuluagasanta@gmail.com

Trabajo de Grado

Asesor:
M.S. John Jairo Agudelo Ospina

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN
2011

RESUMEN

Se presenta a continuación el trabajo de grado “trazado de carreteras mediante sistemas de información geográfica” como requisito para optar por el título de Ingeniero Civil. Se propone inicialmente mejorar el procedimiento por el cual se hace el trazado de línea de ceros y llevarlo a ser completamente digital, para lo cual se elaboró la herramienta “Trazado SIG” que funciona en el software ArcGIS y permite trazar la línea de ceros de una manera completamente interactiva. Tomando datos del SIG de la comunidad de La Rioja, España, se buscó una zona con una condición topográfica similar a las encontradas en el territorio Colombiano y se creó un caso hipotético. Una vez elaboradas las diferentes alternativas de corredor vial usando la información anteriormente mencionada, comienzan una serie de análisis de diferentes características que influyen en la búsqueda de la mejor alternativa de trazado usando metodologías presentadas por autores mencionados en el texto. La diferencia con otros métodos radica en que el uso de la herramienta “Trazado SIG” se garantiza la pendiente longitudinal del corredor antes de hacer cualquier análisis. Finalmente, después de obtener resultados para diferentes características, se integran los mismos y se toma una decisión final respecto a la mejor alternativa para la situación aquí presentada.

Palabras Clave: TRAZADO, SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, SIG, RUTA ÓPTIMA, CARRETERAS, VÍAS.

TABLA DE CONTENIDOS

	pág
INTRODUCCIÓN	10
ALCANCES.....	11
LIMITACIONES.....	11
1. NOCIONES BÁSICAS SOBRE EL TRAZADO DE CARRETERAS.....	13
1.1. DEFINICIÓN.....	13
1.2. RECOMENDACIONES PARA LA LÍNEA DE CEROS	15
2. GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	16
2.1. DEFINICIÓN.....	16
2.2. RECOMENDACIONES PARA LA LÍNEA DE CEROS	16
3. TRABAJOS SIMILARES.....	18
4. HERRAMIENTA “TRAZADO SIG”	19
4.1. ELECCIÓN DE SOFTWARE.....	19
4.2. OBJETIVO	19
4.3. METODOLOGÍA.....	19
4.4. CONCEPTO BÁSICO DE LA HERRAMIENTA	20
4.5. USO DE LAS NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO	20
4.6. INSTALACIÓN	21
4.7. RECOMENDACIONES ANTES DEL USO.....	24
4.8. DEFINICIÓN.....	26

5.	ANÁLISIS DEL TRAZADO ÓPTIMO.....	29
5.1.	INFORMACIÓN USADA	29
5.2.	CASO DE ESTUDIO	29
5.3.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	29
5.4.	TRAZADOS ELABORADOS	30
5.5.	ANÁLISIS DE PENDIENTES TRANSVERSALES	33
5.6.	ANÁLISIS DE ACCIDENTES HIDROGRÁFICOS	38
5.7.	ANÁLISIS DE USOS DEL SUELO	41
5.8.	ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN	44
5.9.	ANÁLISIS DE ESPECIES PROTEGIDAS.....	46
5.10.	OTROS ANÁLISIS	47
5.11.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
6.	CONCLUSIONES	49
7.	RECOMENDACIONES.....	50
	BIBLIOGRAFÍA	51

TABLA DE FIGURAS

	pág
Figura 1-1. Concepto de línea de ceros	13
Figura 1-2. Trazado de línea de ceros con compás.	14
Figura 4-1. Barra de edición de ArcGIS.	19
Figura 4-2. Selección del menú <i>Customize</i>	22
Figura 4-3. Vista del menú <i>Customize</i>	22
Figura 4-4. Búsqueda de archivo.	23
Figura 4-5. Selección de herramienta.	23
Figura 4-6. Ubicación de la herramienta.	24
Figura 4-7. Selección de la opción <i>Snapping</i>	25
Figura 4-8. Ventana <i>Snapping Environment</i>	25
Figura 4-9. Inicio de sesión de edición.	26
Figura 4-10. Ventana inicial de trazado SIG.....	27
Figura 4-11. Uso de la herramienta trazado SIG.....	27
Figura 4-12. Cuadro de diálogo para el cambio de pendiente.....	28
Figura 5-1. Esquema general de los trazados.....	31
Figura 5-2. Perfiles de los trazados.....	32
Figura 5-3. Mapa de pendientes de la zona de estudio.....	33
Figura 5-4. Mapa de pendientes reclasificadas	35
Figura 5-5. <i>Clip</i> de mapa de pendientes reclasificadas.....	36

Figura 5-6. Mapa hidrográfico de la zona de estudio	38
Figura 5-7. Selección de accidentes hidrográficos que cruzan los trazados	39
Figura 5-8. Mapa de usos del suelo de la zona de estudio	41
Figura 5-9. Mapa de pluviosidad de la zona de estudio	44
Figura 5-10. Mapa de áreas de especies protegidas	46

TABLA DE TABLAS

	pág
Tabla 4-1. Valores de la velocidad de diseño de los tramos homogéneos (V_{tr}) en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno	21
Tabla 4-2. Pendiente media máxima (PM_{max}) del corredor de ruta (%) en función de la velocidad de diseño del tramo homogéneo (V_{tr}).....	21
Tabla 5-1. Comparación de alternativas de trazados.....	30
Tabla 5-2. Valoraciones para la pendiente transversal.	34
Tabla 5-3. Ancho de zona según la categoría de la carretera.....	34
Tabla 5-4. Calificación total de trazados para pendientes transversales, opción 1.....	37
Tabla 5-5. Calificación total de trazados para pendientes transversales, opción 2.....	37
Tabla 5-6. Valoraciones para características hidrográficas.....	39
Tabla 5-7. Calificación total de accidentes hidrográficos, opción 1.	40
Tabla 5-8. Calificación total de accidentes hidrográficos, opción 2.	40
Tabla 5-9. Valoraciones para tipos de usos del suelo.	42
Tabla 5-10. Calificación total de tipos de usos del suelo, opción 1	43
Tabla 5-11. Calificación total de tipos de usos del suelo, opción 2	43
Tabla 5-12. Calificación total de pluviosidad, opción 1	45
Tabla 5-13. Calificación total de pluviosidad, opción 2.....	45
Tabla 5-14. Calificación total de áreas de especies protegidas, opción 1	47
Tabla 5-15. Calificación total de áreas de especies protegidas, opción 2	47

Tabla 5-16. Análisis final de resultados 48

INTRODUCCIÓN

Aunque el ingeniero de vías día a día cuenta con mejores recursos para el trazado de carreteras (equipos, software, mapas, imágenes digitales, entre otros) la metodología para esta actividad no ha sufrido mayores cambios en los últimos años. Esta metodología sigue siendo un proceso manual y dispendioso lo que encarece y dilata muchos los proyectos de carreteras. De igual manera el análisis de la información, que es muy diversa y a veces extensa, se realiza de una forma individual para cada una de las áreas del proyecto (geotecnia, geología, impacto ambiental, hidrología, uso del suelo, topografía, etc.) lo que dificulta la selección de la mejor opción o alternativa de trazado.

En la medida que el proyecto tenga una mayor longitud se incrementan tanto los tiempos de trabajo como la cantidad de información a analizar dificultando aún más el trabajo interdisciplinario que requiere el estudio del trazado de una carretera.

Los sistemas de información geográfica (SIG) han permitido integrar enormes cantidades de información con el fin de buscar un objetivo común, cualquier sea el caso, y la ingeniería civil no ha sido la excepción. Actualmente los SIG se emplean en diversas aplicaciones dentro del área de las carreteras y el transporte pero más enfocado a lo concerniente a la gestión, administración, operación y mantenimiento. Aunque se ha empezado a incursionar en el tema del trazado lo poco que se ha hecho no considera todas las variables o factores que influyen en un proyecto de esta naturaleza.

Con el uso de los SIG se podrán estudiar de una manera más rápida varios corredores o rutas, considerar diferentes factores de diseño y además modificar el peso o influencia que tenga cada uno de los factores considerados. Cuando se determina un posible corredor de una carretera de montaña no es fácil obtener en primera instancia el más favorable y muchas veces por cuestiones económicas o de tiempo no se estudian otras alternativas que podrían arrojar condiciones más favorables. Un aspecto muy importante en el uso de los SIG para el trazado de una carretera, es que aún prevalece de manera notoria el criterio del ingeniero de diseño, ya que lo que se busca es un equilibrio entre lo técnico y lo económico. Los trazados más económicos no siempre son los mejores desde el punto de vista técnico y los mejores trazados no siempre son los más económicos.

Es importante anotar que cuando se utiliza un SIG para determinar la factibilidad de un proyecto es imprescindible contar con la información apropiada en cuanto a calidad, cantidad y cobertura; pero también es claro que cualquiera que sea la metodología las exigencias serán las mismas o aún mayores en cuanto a la información disponible.

También se debe indicar que un buen trazado no garantiza un buen diseño geométrico por lo que es importante que para esta segunda actividad se disponga del personal idóneo en el tema.

Es por esto que este proyecto de grado tiene como objetivo generar un procedimiento por el cual un sistema de información geográfica sea encaminado para que a partir de parámetros establecidos de acuerdo con los requerimientos colombianos y diferentes factores topográficos, geológicos, hidrológicos, ambientales y catastrales se obtengan las mejores opciones de trazado para un corredor vial.

Para lograr dicho objetivo se hace necesario investigar sobre los actuales avances en la generación de trazados y alineamientos de carreteras mediante SIG, utilizar métodos de programación de SIG para desarrollar una herramienta computacional que permita la simplificación del procedimiento de trazado de carreteras y su uso en archivos digitales, y finalmente utilizar dicha herramienta para aplicarla en un lugar geográfico del cual pueda encontrarse suficiente información de calidad.

ALCANCES

Con este proyecto de grado se pretende hacer una implementación de diferentes metodologías existentes que han sido desarrolladas para hacer trazados y alineamientos de vías con el uso de software de sistemas de información geográfica. Dicha implementación se hará en el software ArcGIS, actualmente instalado en las salas de cómputo de la universidad EAFIT.

Concretamente se pretende escoger una zona geográfica de dificultad moderada, que sea característica de nuestro país y de la cual sea posible obtener información topográfica, geológica, hidrográfica, catastral, etc. de calidad para iniciar la aplicación. Es de anotar que dicha aplicación se hará para un alineamiento completamente nuevo.

Una vez la información obtenida sea procesada para poderse utilizar en el software SIG, se elaboraran dos opciones de trazados y finalmente se procederá a evaluar cada uno de los trazados explicando la metodología usada de acuerdo con cada característica analizada.

LIMITACIONES

La aplicación de las metodologías y los resultados se verán limitados por los siguientes factores:

1. La calidad y la cantidad de información obtenida afectara directamente los resultados arrojados por el software, es decir la calidad del trazado.

2. Como en la mayoría de aplicaciones computacionales el software posee limitaciones; en caso de que se encuentre algunas que afecten el normal desarrollo del proyecto se hará mención de ellas.
3. Habrá un límite de recursos para inversión en este proyecto de grado lo que puede afectar la calidad y cantidad de información que se pueda obtener y por lo tanto los resultados.
4. Como se ha mencionado anteriormente en la aplicación solo se llegará hasta el trazado de un corredor vial. A partir de este resultado se puede hacer el resto del diseño de la vía con diferentes software como "Vías" del ingeniero John Jairo Agudelo.
5. El análisis de las diferentes características de los trazados tendrá como objeto mostrar una metodología de estudio para la toma de decisiones respecto a la aptitud o no de un trazado. Los detalles técnicos de cada valoración no corresponden al objetivo de este proyecto de grado, la persona que use la metodología aquí escrita deberá usar su propio criterio técnico o en el mejor de los casos el de un equipo interdisciplinario.
6. Puesto que el objeto es más metodológico que operativo, se plantean dos áreas ficticias que deben ser comunicadas mediante una vía.

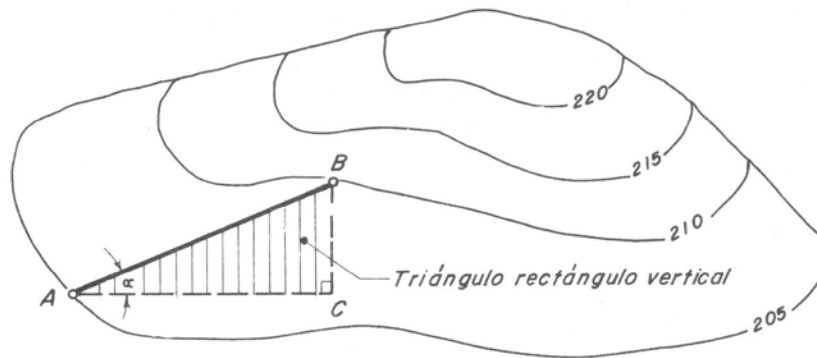
1. NOCIONES BÁSICAS SOBRE EL TRAZADO DE CARRETERAS

1.1. DEFINICIÓN

El trazado se define como el proceso de identificación de una potencial franja lineal de terreno que conectara dos lugares geográficos. Dicha identificación, con el fin de ser materializada y de tener herramientas de trabajo es plasmada en un plano topográfico. La principal herramienta para este proceso es la elaboración de la *línea de ceros*, que es una línea que conserva una pendiente uniforme al pasar por puntos obligados del proyecto y que de coincidir el eje de la vía con ésta, el movimiento de tierra sería virtualmente cero, siendo así un eje económico desde éste punto de vista (CÁRDENAS, 2000).

El concepto de la línea de ceros se explica de la siguiente manera:

Figura 1-1. Concepto de línea de ceros



Tomado de: CÁRDENAS G., James. Diseño Geométrico de Vías

Considérese los puntos “A” y “B” sobre las curvas de nivel 205 y 210 respectivamente (Figura 1-1). La pendiente de la recta “AB” estaría determinada por:

$$\text{Pendiente } AB [\%] = \frac{BC}{AC} \times 100\% \quad (1-1)$$

Dónde:

AC: Distancia horizontal entre curvas de nivel

BC: Equidistancia vertical entre curvas de nivel

Dado que la distancia vertical entre curvas de nivel es siempre igual, el término “BC” es fijo, y como se conoce la pendiente uniforme deseada, la distancia “AC” será:

$$AC = \frac{BC}{\text{Pendiente AB} [\%]} \times 100\% \quad (1-2)$$

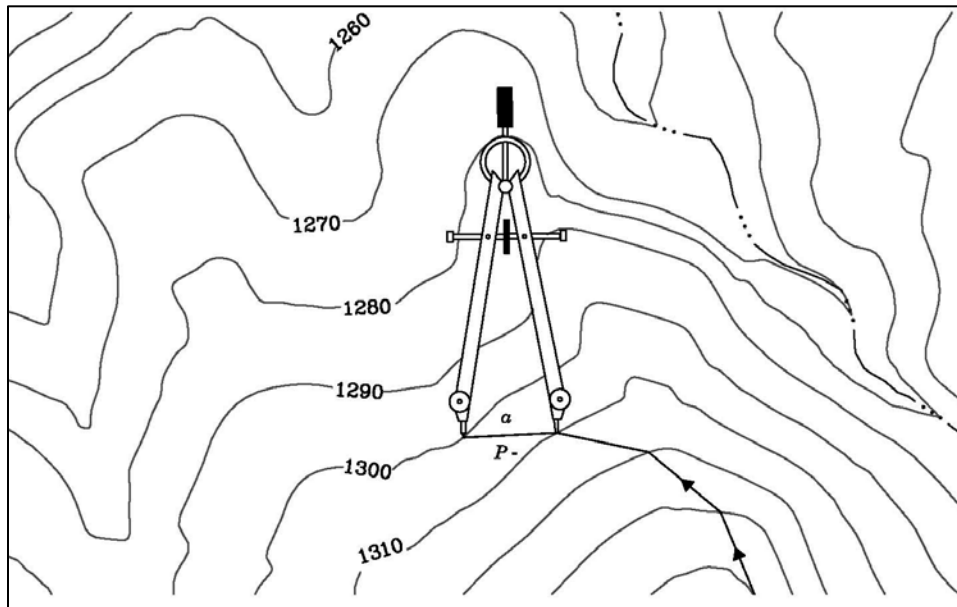
También se puede decir:

$$a = \frac{\Delta \text{ curvas}}{p} \times 100\% \quad (1-3)$$

Donde a es la apertura del compás sin escala, Δ curvas es la distancia vertical entre curvas adyacentes, y p es la pendiente en porcentaje. Se hace claridad en que las unidades de distancia deben ser las mismas para todos los casos.

El paso siguiente es reducir la apertura del compás a encontrada a la escala del plano en el cual se está trabajando. Con esta apertura fijada, se ubica un extremo en un punto obligado y el otro extremo en la curva de nivel más cercana según se esté ascendiendo o descendiendo y a la dirección deseada; se marca y este punto marcado se vuelve el próximo punto obligado inicial. Así se continua sucesivamente hasta llegar hasta otro punto obligado como se muestra en la Figura 1-2.

Figura 1-2. Trazado de línea de ceros con compás



Fuente: Construcción del autor

1.2. RECOMENDACIONES PARA LA LÍNEA DE CEROS

Como el trazado es la base para el posterior diseño geométrico, es importante considerar con anterioridad los elementos que permiten el desarrollo de un buen alineamiento horizontal y vertical, puesto que, si el trazado no permite la elaboración de un buen diseño geométrico se generan dificultades para el normal desarrollo de esta etapa del diseño.

Es por esto que AASHTO en su manual "A policy on geometric design of highway and streets" año 2004, presenta los siguientes controles que "aunque no son sujetos a evaluación teórica son muy importantes para la eficiencia y el buen flujo de vehículos en la vía. Demasiadas curvas o malas combinaciones de las mismas pueden limitar la capacidad causando pérdidas económicas debido al mayor tiempo de viaje y costo operativo, y hacer la vía poco atractiva visualmente. Estas recomendaciones deben hacerse donde sean prácticas."

- El alineamiento debe ser consistente con la topografía preservando las propiedades y los valores propios de la zona. Una línea que fluye conforme a los contornos naturales es preferible que tener largas tangentes que cortan fuertemente el terreno. Así, en alineamientos curvilíneos las cicatrices constructivas serán minimizadas y las pendientes naturales preservadas. Este tipo de diseño es preferible desde un punto de vista constructivo y de mantenimiento. En general el número de curvas cortas debe ser mantenido al mínimo, puesto que tramos muy curvados pueden conllevar operaciones erráticas, además en vías de dos carriles es necesario tener suficiente distancia de visibilidad de adelantamiento como sea práctico.
- En alineamientos con velocidad de diseño establecida, el radio mínimo de curvatura para esa velocidad debe ser evitado donde sea posible, dejando éste para ser usado en situaciones más críticas. Los ángulos centrales o deflexiones de las curvas debe ser tan pequeño como las condiciones físicas lo permitan.
- Siempre se deben buscar alineamientos consistentes. Curvas cerradas al final de largas tangentes deben ser evitadas, así como cambios repentinos en áreas de curvatura suave a curvatura fuerte. Cuando hayan zonas de curvatura fuerte, debe introducirse por medio de curvas sucesivamente más fuertes.
- Curvaturas fuertes deben ser evadidas en zonas altas y planas. La ausencia de taludes, arbustos y árboles a nivel de carretera hace difícil para el conductor percibir la extensión de la curvatura y ajustar su operación acordemente.

2. GENERALIDADES SOBRE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

2.1. DEFINICIÓN

Existen variadas definiciones acerca de los SIG, y a medida que diferentes personas y entidades les encuentran más funcionalidades, sus percepciones cambian y así como sus descripciones. Una definición muy clara y sencilla la hace el *United States Geology Survey* que dice que un SIG es un sistema de computador capaz de capturar, guardar, analizar y mostrar información referenciada geográficamente, su poder y diferencia de cualquier otro sistema de información radica en la habilidad de relacionar información en un contexto espacial para llegar a conclusiones acerca de su relación.

2.2. APLICACIONES

ESRI™, compañía líder en el desarrollo de SIG enuncia 4 principales actividades que con dichos sistemas se pueden hacer:

- **UBICAR:** Ubicar donde están las cosas permite encontrar lugares que tienen las características que se buscan y permite ver donde se pueden tomar las acciones necesarias.
- **CUANTIFICAR:** Las personas ubican las cantidades, lo más y lo menos, para encontrar lugares que cumplan con los criterios que buscan y tomar acciones, o simplemente para encontrar relaciones entre los lugares. Esto da un nivel adicional de información más allá de solo localizar características.
- **MOSTRAR:** En áreas con muchas características puede ser difícil ver qué área tiene mayores concentraciones que otras de una determinada característica, un SIG permite en un mapa, medir el número de características usando una unidad aérea uniforme como metros cuadrados o hectáreas, permitiendo así, ver claramente las distribuciones.
- **ANALIZAR:** Se puede usar un SIG para monitorear que está pasando dentro de un área específica para tomar acciones, encontrar que hay cerca de un lugar con características especiales y encontrar cambios en un área que pueden ayudar a anticipar condiciones futuras.

Dentro de cada uno de estas 4 actividades se enmarcan una infinidad de aplicaciones específicas en muchísimas industrias que han visto como el uso de SIG ha ayudado al mejoramiento de su desempeño en términos técnicos y económicos. Como el propósito principal de este proyecto está relacionado con

transporte, se hará énfasis en las aplicaciones desarrolladas para GIS-T, nombrado así por AASHTO, que traduce SIG para transporte. Aquí se han enmarcado las industrias de aviación, vías, logística, puertos marítimos, transporte público y ferrocarriles, en las cuales se ha encontrado las grandes bondades de los SIG para administrar, planear, evaluar y mantener estos sistemas de transporte.

En vías hay diferentes focos sobre los que se han elaborado aplicaciones como lo son el planeamiento, diseño, administración de la construcción, operación, seguridad, sistemas inteligentes de transporte y mantenimiento. De interés para este desarrollo es el planeamiento y diseño puesto que aunque la necesidad de nueva infraestructura ha sido identificada, también es responsabilidad del diseñador asesorar en la preservación de la calidad de vida y del ambiente, y es más que obvio que el trazado de la ruta es parte del diseño de la vía.

3. TRABAJOS SIMILARES

URRIOLA P., Ricardo Alberto *et al* (2002) en su documento “Selección de la ruta óptima para el trazado de una carretera mediante un sistema de información geográfica (SIG): Ruta Las Gonzales – Estanques” proponen “una metodología para la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la selección de la ruta óptima para el trazado de una carretera.” Según su metodología la ruta optima es considerada la de menor costo económico y ambiental. Básicamente digitalizaron información topográfica, litológica, hidrográfica y ambiental en archivos *raster*, reclasificaron cada pixel en términos de los costos económicos dependiendo de sus características particulares referido a un costo unitario de costo de ejecución, es decir, un valor de 1 en un pixel representa un costo base de construcción y un valor de 2 representa un esfuerzo doble respecto al costo base de construcción y por lo tanto doble costo económico. Posterior a la reclasificación de todos los pixeles dado su criterio de valoración, usaron el comando *pathway* del SIG Idrisi, el cual determina el camino de costo mínimo entre una o más celdas objetivo.

Este procedimiento de utilizar superficies de costo es usado por varios autores como URRIOLA P., Ricardo Alberto *et al* (2002) y GÓMEZ D., Monserrat *et al*, (1995), y es también explicado en profundidad en los archivos de ayuda del software ArcGIS®. El principal inconveniente de este procedimiento es que no garantiza de ninguna manera la pendiente longitudinal del trazado, lo que representa un problema técnico a la hora de continuar con los diseños viales. Esto tal vez no sea un problema en zonas con topografía plana u ondulada, pero en las zonas montañosas y escarpadas si constituye un inconveniente.

ROGERS, Luke (2001) de la Universidad de Washington, EE.UU. presentó una extensión para ArcView 3.2 llamada *Pegger* como tesis de maestría. *Pegger* funciona basado en la ecuación 1.3 de este documento como una herramienta para el trazado de rutas creada para ayudar a los ingenieros forestales a determinar rápidamente trazados óptimos para diferentes labores en los bosques. En su herramienta se inicia un trazado indicando el punto donde desea iniciar y la pendiente deseada, para continuar trazando simplemente se hacen clicks sucesivos en la dirección general en la cual se desea ir; la pendiente puede ser cambiada en cualquier momento mediante un menú desplegable. Es de anotar que el uso de esta herramienta fue observado en un video pues solo está disponible como extensión para ArcView 3.2.

4. HERRAMIENTA “TRAZADO SIG”

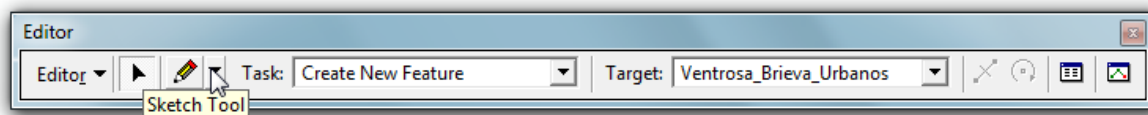
4.1. ELECCIÓN DE SOFTWARE

El Software elegido para el tratamiento de datos de éste proyecto es ArcGIS® 9.3. Este sistema de información geográfica desarrollado por la compañía americana ESRI™ es probablemente el SIG más reconocido mundialmente por su versatilidad para el procesamiento y análisis de información extensa. Aparte de que la universidad EAFIT cuenta con este software, permite ser programado en Visual Basic, algo muy atrayente considerando que es un lenguaje de programación muy común y se tiene familiaridad con el mismo.

4.2. OBJETIVO

La idea básica de la línea de ceros, como se menciona en el Capítulo 1, es trazar una línea de longitud conocida de acuerdo con la pendiente deseada y el espaciamiento vertical entre curvas de nivel. Esta idea inicialmente fue abordada en ArcGIS mediante la herramienta de dibujo *Sketch Tool* perteneciente a la barra de edición.

Figura 4-1. Barra de Edición de ArcGIS



Esta herramienta en su menú contextual permite establecer una longitud determinada únicamente para el segmento de línea que se está creando en ese instante, pero al pasar al siguiente ésta restricción se pierde. Hacer un trazado completo con esta metodología podría ser igual o más dispendioso que el procedimiento manual elaborado en planos físicos. A partir de esta característica de la herramienta de dibujo y a la vez de su desventaja en términos de mantener una longitud de línea para varios segmentos sucesivos surgió la idea de crear mediante procedimientos programáticos una herramienta que permitirá solucionar el problema anteriormente mencionado; aquí inicia “Trazado SIG” como un proyecto de desarrollo de una herramienta como parte de la aplicación objetivo de este proyecto de grado.

4.3. METODOLOGÍA

Al estudiar la manera cómo se comporta la herramienta *Sketch* propia de ArcGIS se entendió que había la posibilidad de imitar el concepto de la herramienta y personalizarla de manera que a partir de datos ingresados por el usuario, la

longitud del segmento fuera constante hasta que el usuario la cambiara o simplemente finalizara el procedimiento.

La programación de este software en la Universidad EAFIT era algo completamente nuevo y qué hasta el momento no se conocían casos donde estudiantes o profesionales pertenecientes a la institución lo hubieran intentado, lo cual implicó empezar a consultar absolutamente toda la información en fuentes externas a la universidad e incluso al país. Aquí comienza el reto.

Definido el alcance de la herramienta, se colocaron sobre la mesa muchos temas inciertos como la forma de programar con el lenguaje Visual Basic, documentación al respecto, personas que pudieran ayudar, etc., afortunadamente ESRI™ cuenta con una sección en su página web que está dedicada exclusivamente a desarrolladores; aquí se encuentra documentación propia de ESRI™ respecto a su software ArcGIS®, foros de discusión, descargas e intercambio de códigos. Es importante resaltar a todas las personas que se aventuren en este desafío de programación, que esta puede ser la mejor y en muchos casos la única fuente de información útil.

4.4. CONCEPTO BÁSICO DE LA HERRAMIENTA

La herramienta es básicamente un encapsulamiento de la herramienta *Sketch* que posteriormente fue personalizada para que su longitud de segmento estuviera gobernada por la ecuación 1-3, la cual es análoga a la apertura (a). Por lo tanto el usuario debe proporcionar el Δ curvas y la pendiente inicial deseada. Dicha herramienta fue desarrollada en lenguaje Visual Basic en el software Visual Basic 6 y compilada en un DLL que puede ser usado por cualquier persona que tenga instalado ArcMap®.

4.5. ADOPCIÓN DE LAS NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO

La herramienta fue regulada con la normatividad colombiana de la fecha, el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras de INVIAS (2008). La pendiente, que es la principal característica de diseño de esta herramienta, está determinada por la Tabla 4-1 y la Tabla 4-2 respectivamente; esto fue incluido en su código al igual que las limitantes para que nunca se supere por exceso (ascenso) o defecto (descenso) la pendiente media máxima (PM_{max}), ni la pendiente mínima que garantiza el drenaje adecuado de las vías.

En la herramienta se determinó que en la categoría de carretera terciaria el diseñador es responsable de la pendiente media máxima (PM_{max}) a utilizar debido a las características de este tipo de vías y para darle cierta versatilidad a la herramienta, puesto que puede ser usada en muchas otras aplicaciones además del diseño vial.

Tabla 4-1. Valores de la Velocidad de Diseño de los Tramos Homogéneos (V_{tr}) en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	TIPO DE TERRENO	VELOCIDAD DE DISEÑO DE UN TRAMO HOMOGÉNEO V_{TR} (km/h)										
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	
Primaria de dos calzadas	Plano											
	Ondulado											
	Montañoso											
	Escarpado											
Primaria de una calzada	Plano											
	Ondulado											
	Montañoso											
	Escarpado											
Secundaria	Plano											
	Ondulado											
	Montañoso											
	Escarpado											
Terciaria	Plano											
	Ondulado											
	Montañoso											
	Escarpado											

Tomado del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, INVIAS

Tabla 4-2. Pendiente Media Máxima (PM_{max}) del corredor de ruta (%) en función de la Velocidad de Diseño del Tramo homogéneo (V_{tr})

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	VELOCIDAD DE DISEÑO DEL TRAMO HOMOGÉNEO V_{TR} (km/h)									
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Primaria de dos calzadas	-	-	-	-	-	6	6	6	5	5
Primaria de una calzada	-	-	-	-	7	7	6	6	5	-
Secundaria	-	-	7	7	7	7	6	-	-	-
Terciaria	7	7	7	-	-	-	-	-	-	-

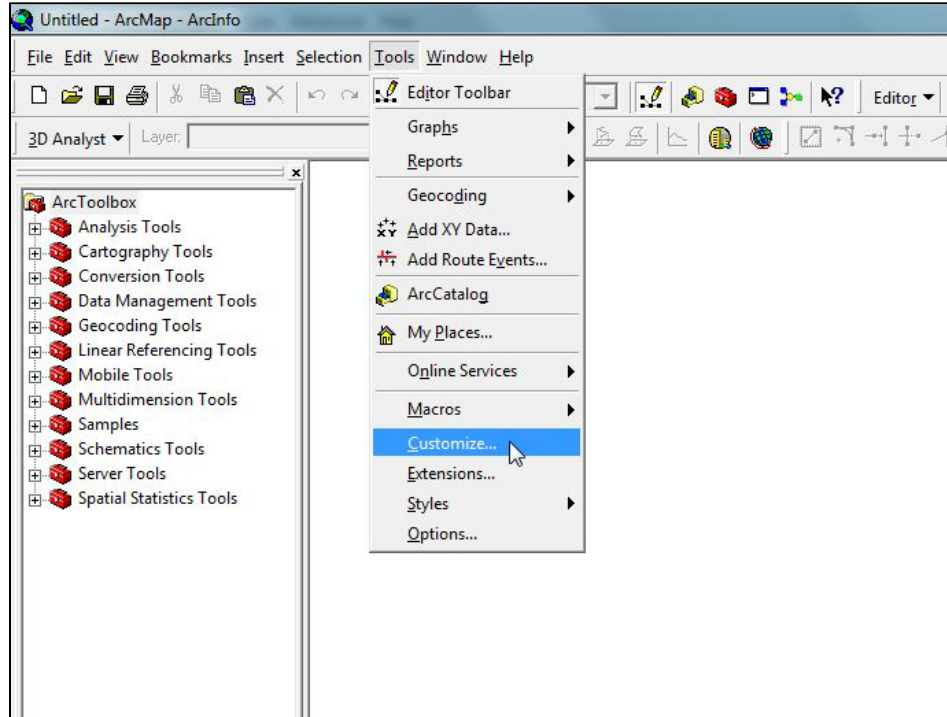
Tomado del Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, INVIAS

4.6. INSTALACIÓN

A continuación se presenta paso a paso la manera de instalar la herramienta "Trazado SIG".

1. Dirijase al menu *Tools* y elegir la opción *Customize...*

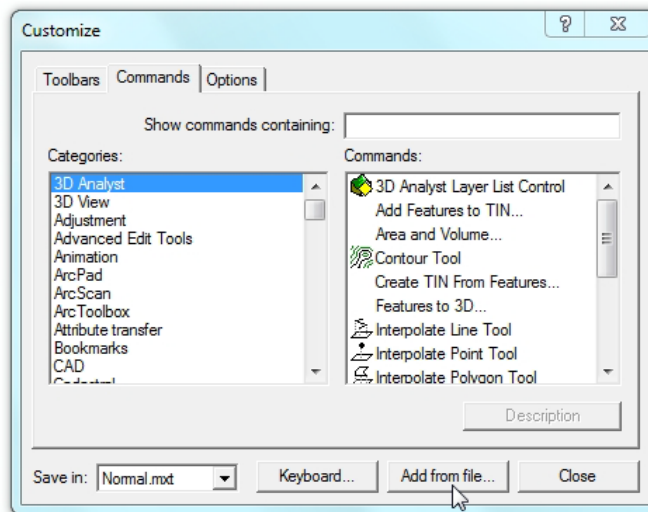
Figura 4-2. Selección del menú *Customize...*



Tomado de: ArcMap®

2. En la ventana *Customize* en la parte inferior central encontrara la opción *Add From File*, seleccionarla y se desplegara una ventana de búsqueda.

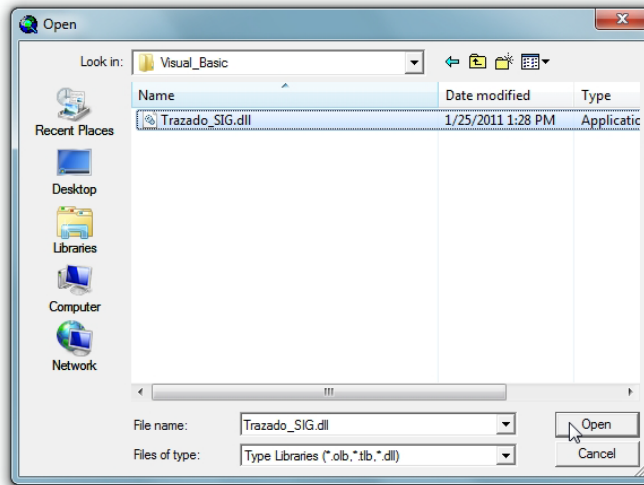
Figura 4-3. Vista del menú *Customize...*



Tomado de: ArcMap®

3. En la ventana de búsqueda, ubique el archivo “Trazado_SIG.dll” en donde usted lo haya guardado, selecciónelo y presione *Open*

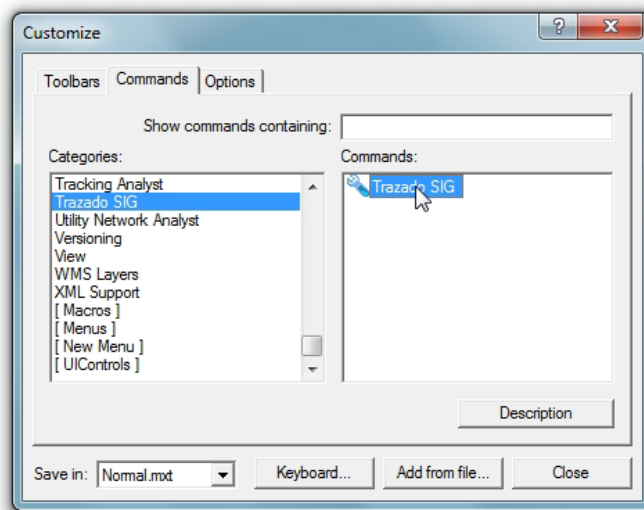
Figura 4-4. Búsqueda de Archivo



Tomado de: ArcMap®

4. Seleccione la etiqueta *Commands* y la herramienta la encontrará en la categoría “Trazado SIG”

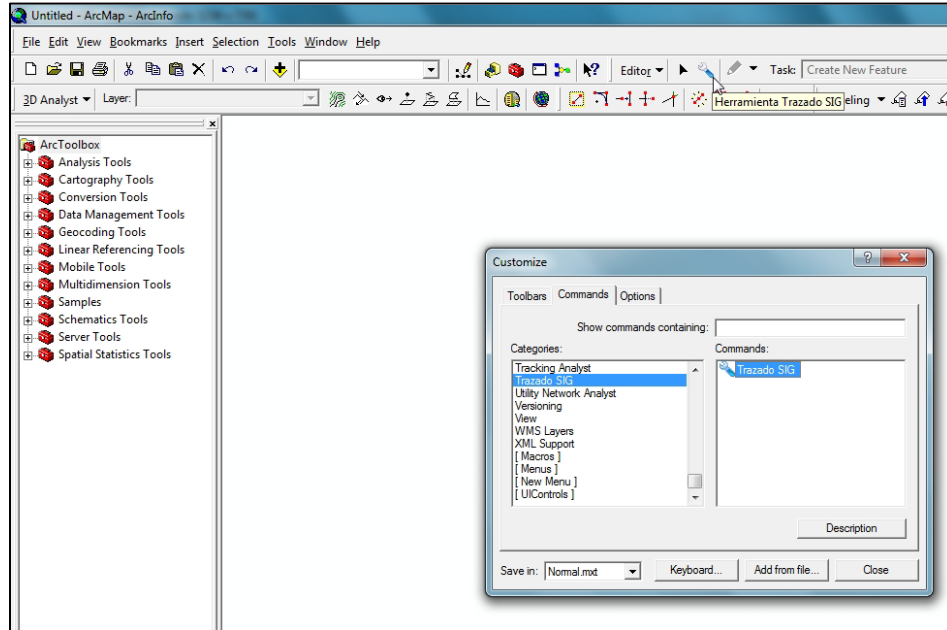
Figura 4-5. Selección de Herramienta



Tomado de: ArcMap®

5. Arrastre con un click sostenido la herramienta a la ubicación de su preferencia en cualquiera de las barras de herramientas activas.

Figura 4-6. Ubicación de la herramienta



Tomado de: ArcMap®

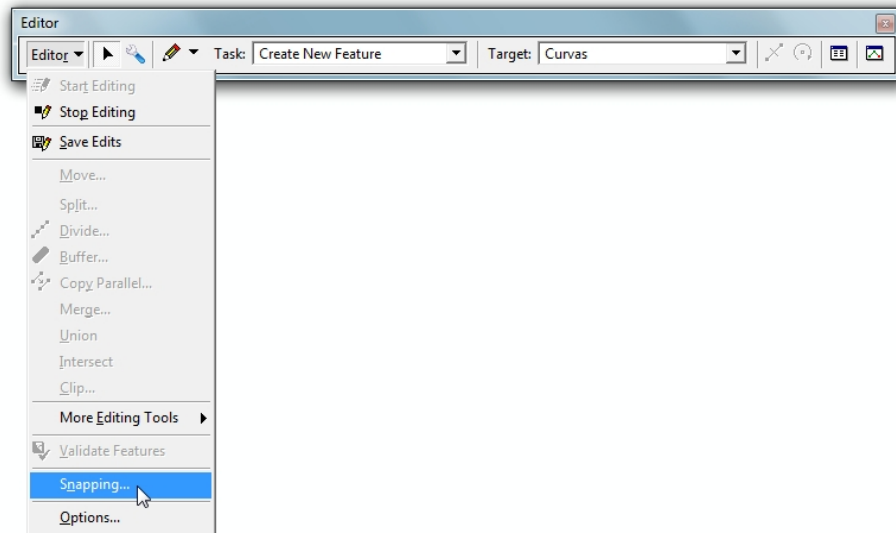
4.7. RECOMENDACIONES ANTES DEL USO

Una vez instalada la aplicación, el uso de la misma es muy sencillo y será explicado más adelante, pero para un mejor manejo de la misma se sugiere tener las siguientes recomendaciones siempre presentes:

1. Es necesario para un nuevo trazado tener definida la Velocidad de Diseño (V_{tr}) de acuerdo a los parámetros de la Tabla 4-1.
2. Antes de iniciar un trazado, es importante crear un archivo *Shape* de polilínea en el cual se guardarán todos los atributos del nuevo trazado que será elaborado con la herramienta Trazado SIG. Aunque no es completamente necesario y el trazado puede crearse sobre cualquier otro *Shape* de polilínea, se sugiere manejar cada elemento como un archivo independiente, puesto que de no hacerse de esta manera, el procedimiento para sacar el perfil de elevaciones y la exportación de los trazados puede ser entorpecido.
3. Es de gran utilidad para garantizar la precisión activar el *Snapping* a las curvas de nivel. De esta manera se simplifica el proceso al adherirse la nueva ruta automáticamente a las curvas de nivel. Esto se hace de la siguiente manera:

- a. En la barra de edición, en el menú “Editor” seleccionar la opción *Snapping...*

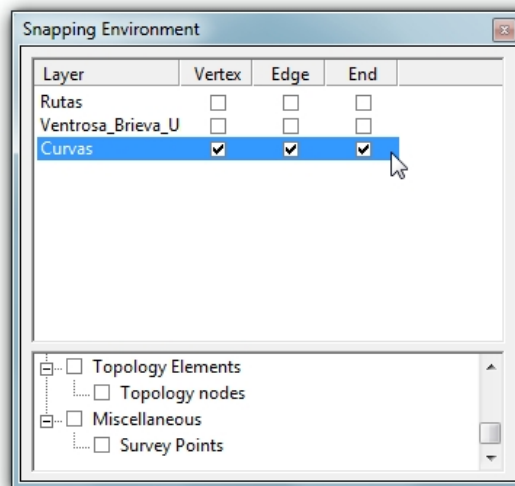
Figura 4-7. Selección de la opción *Snapping...*



Tomado de: ArcMap®

- b. Activar las tres (3) casillas de verificación correspondientes a *Vertex*, *Edge* y *End* del *layer* de curvas. La ventana puede ser cerrada después de hacer la activación.

Figura 4-8. Ventana *Snapping Environment*

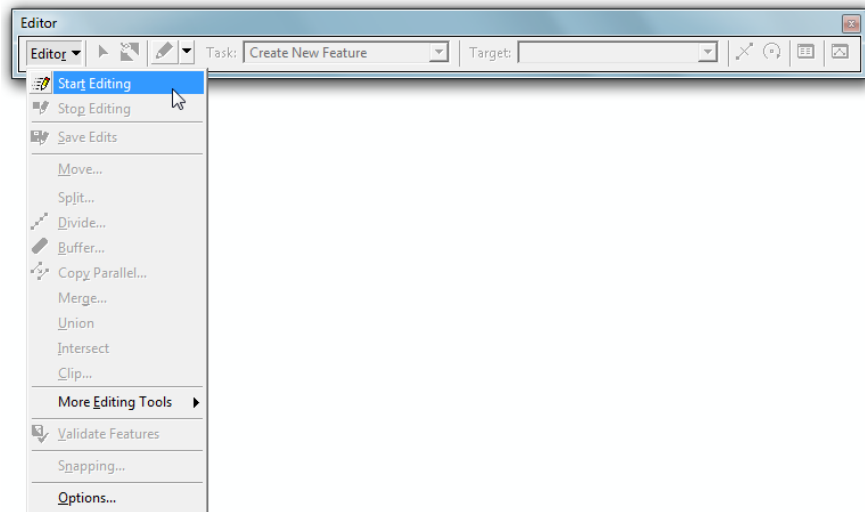


Tomado de: ArcMap®

4.8. INSTRUCCIONES DE USO

1. Una vez se tenga la información que se considere apropiada y la herramienta instalada se puede comenzar con el uso de la misma. El primer paso consiste en iniciar una sesión de edición en el *layer* en el cual se desea guardar la información de los trazados a elaborar. Hasta que no se inicia una sesión de edición la herramienta estará deshabilitada.

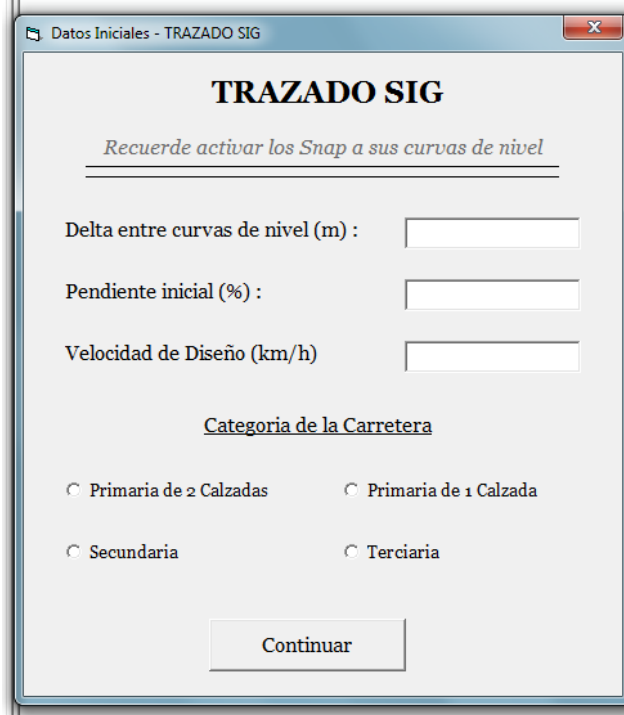
Figura 4-9. Inicio de sesión de edición



Tomado de: ArcMap®

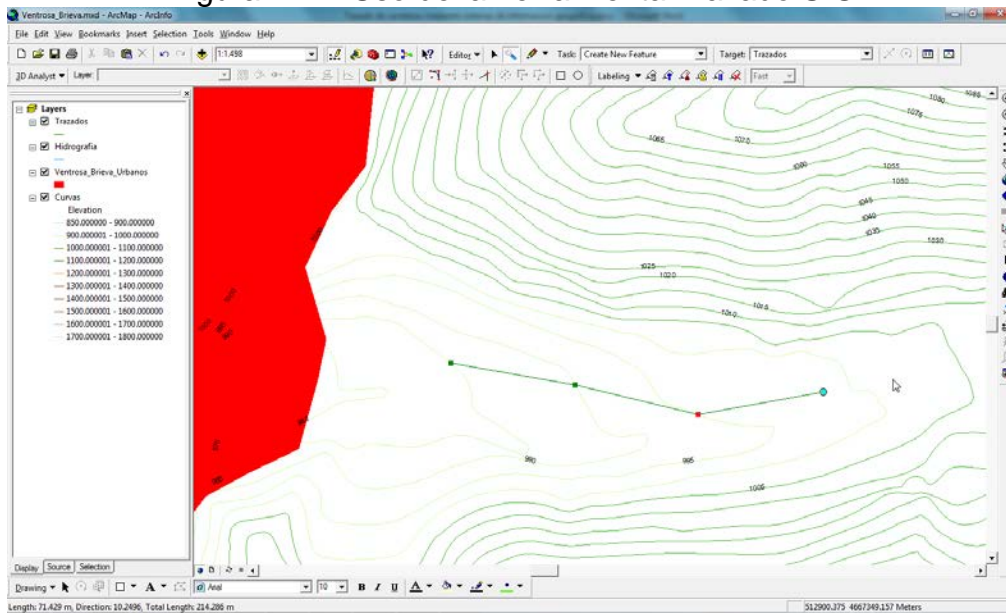
2. Al activar la herramienta aparecerá una ventana de edición la cual solicitará la información necesaria para su ejecución. La pendiente de esta herramienta está normalizada con el Manual de Diseño Geométrico de Vías de INVIAS; si por algún motivo usted desea que no haya restricción de pendiente elija la categoría de carretera como terciaria, en la cual se deja a criterio del diseñador el manejo de la misma.

Figura 4-10. Ventana inicial de Trazado SIG



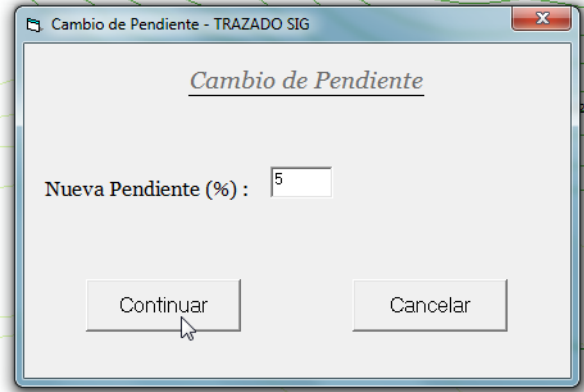
3. Una vez verificada toda la información se puede empezar a hacer el trazado con la pendiente inicial establecida.

Figura 4-11. Uso de la herramienta Trazado SIG



4. Para cambiar la pendiente, simplemente se debe pulsar click derecho y aparecerá el cuadro de dialogo que permite hacer esta operación.

Figura 4-12. Cuadro de dialogo para el cambio de pendiente



5. La restricción de longitud puede ser eliminada al pulsar la tecla “ESC”, en la esquina superior izquierda de su teclado. Esto es de utilidad cuando se harán sobrepasos sobre corrientes de agua o se desea hacer un trazado libre sobre una misma curva de nivel.
6. Esta herramienta permite hacer uso del botón “deshacer”, el cual deshace uno a uno los segmentos de línea ya trazados. Cuando se usa este botón la restricción en la longitud de la línea se pierde debido a que los procedimientos programáticos también fueron revertidos, para establecer de nuevo la pendiente se debe presionar el click derecho y digitar la pendiente deseada.
7. Para finalizar el procedimiento se hace doble click en el último punto de su trazado y finalice la sesión de edición guardando los cambios.

5. ANÁLISIS DEL TRAZADO ÓPTIMO

5.1. INFORMACIÓN USADA

Dada la limitación de tiempo y de recursos para la obtención de información de buena calidad, se optó por usar la información de la provincia de La Rioja, España. Los españoles han sido pioneros en el uso de sistemas de información geográfica y por esto La Rioja en su página web (Gobierno de la Rioja, España) tiene una extensa cantidad de información completamente digitalizada y sin costo para el usuario; adicionalmente, parte de su topografía se ajusta a las condiciones de montaña en la cual se busca hacer la aplicación de este proyecto de grado.

5.2. CASO DE ESTUDIO

El área escogida para hacer los trazados se encuentra ubicada entre los Municipios de Ventrosa y Brieva de Cameros. Se escogió porque es una topografía montañosa, similar a condiciones geográficas de nuestro país. Con el fin de ser lo suficientemente ilustrativo se creó un caso hipotético en el cual se tenían dos áreas alejadas por una distancia horizontal de aproximadamente 4,300 m y vertical de 700 m, y en la que era posible trazar dos rutas completamente independientes geográficamente, es decir, que fueran lo suficientemente alejadas para que sus condiciones de análisis fueran diferentes y se hiciera notable un contraste en los resultados.

Aunque la distancia de estudio parezca un poco corta, debe aclararse que es necesario desarrollar esta aplicación en una cantidad de tiempo limitada.

El Manual de Diseño Geométrico de Carreteras de INVIAS, en el capítulo 1.3. - Planeación y ejecución del proyecto de una carretera, describe las actividades y estudios necesarios para el desarrollo de un proyecto vial nuevo. Como el objetivo principal de esta herramienta es el trazado y elección del mejor corredor vial de acuerdo con diferentes criterios, ciertas actividades y estudios no serán ejecutados de ninguna manera, y algunas asunciones serán hechas.

Debido a que no se cuenta con un estudio de tránsito para definir el nivel de servicio y la capacidad necesaria de la vía, se categorizara la vía a diseñar como terciaria en terreno montañoso y se usara una pendiente máxima para el trazado de 10%.

5.3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Para el análisis de la mejor ruta básicamente se usaran los siguientes pasos:

1. Como los trazados elaborados con la herramienta Trazado SIG son polilíneas, es necesario determinar basado en el tipo de análisis a realizar,

si él mismo puede hacerse sin establecer un ancho para las polilíneas, en caso contrario, se transforman en polígonos mediante la utilización de las herramientas de análisis de ArcGIS (procedimiento explicado más adelante), quedando así un área determinada por un ancho que varía dependiendo de las condiciones de análisis, y la longitud de la línea del trazado.

2. Reclasificación de las características usando la metodología establecida por URRIOLA P. Ricardo Alberto *et al* (2002) para cada caso en particular. Como el objetivo principal es demostrar la capacidad de la herramienta creada y la metodología de análisis, la idea no es poner en tela de juicio los criterios con los cuales cada característica fue reclasificada. Si esta metodología es utilizada por otra persona, la valoración de las características dependerá del criterio personal de usuario.
3. Cuantificación de las áreas inscritas en los polígonos creados en el paso 1, análisis y conclusiones para cada caso en particular.

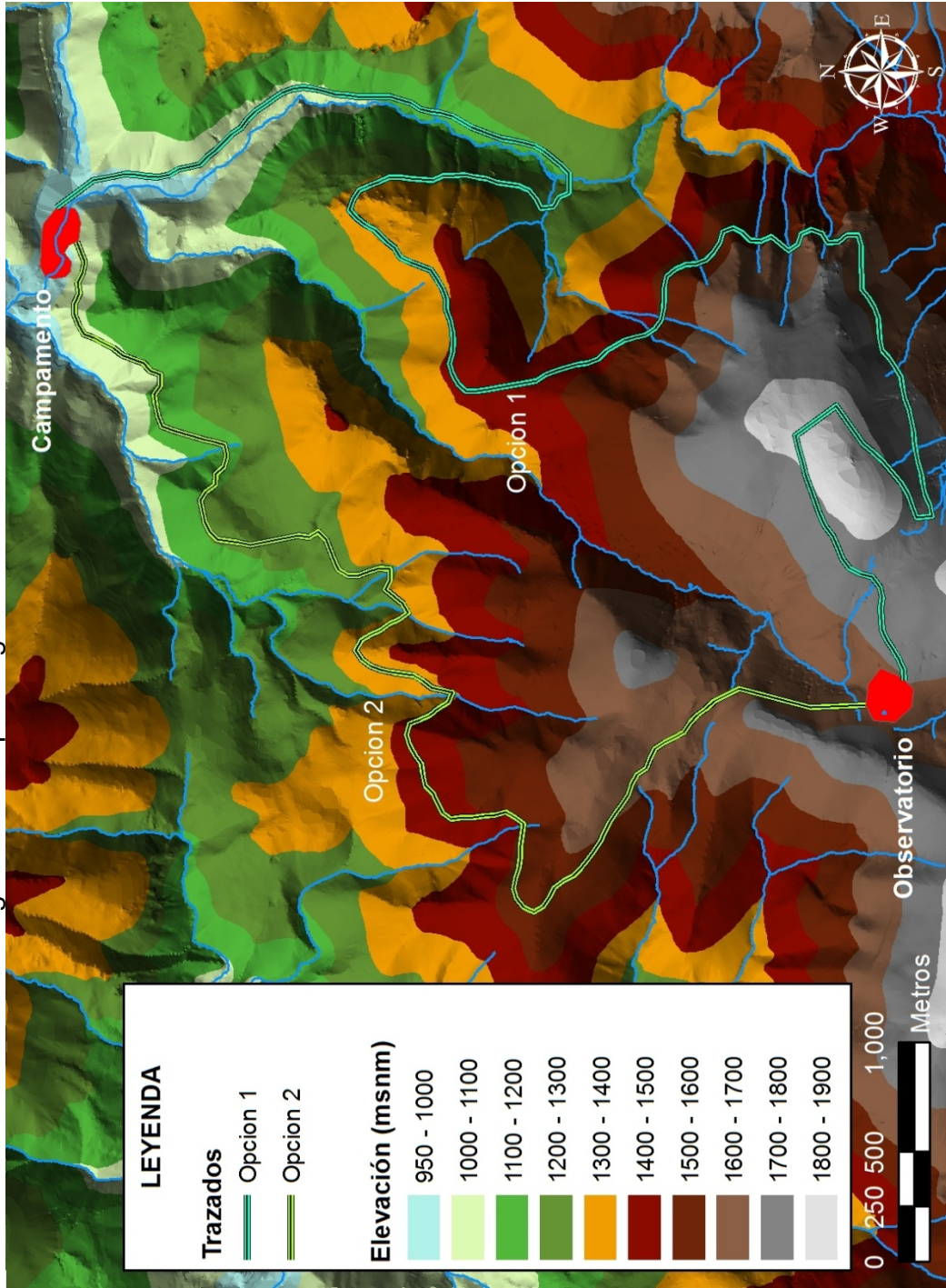
5.4. TRAZADOS ELABORADOS

Se utilizó la herramienta Trazado SIG para la elaboración de dos trazados completamente independientes que cumplieran con la condición de pendiente máxima establecida en el numeral 5.2. A continuación se presentan imágenes ilustrativas de su localización, perfiles y características.

Tabla 5-1. Comparación de alternativas de trazados

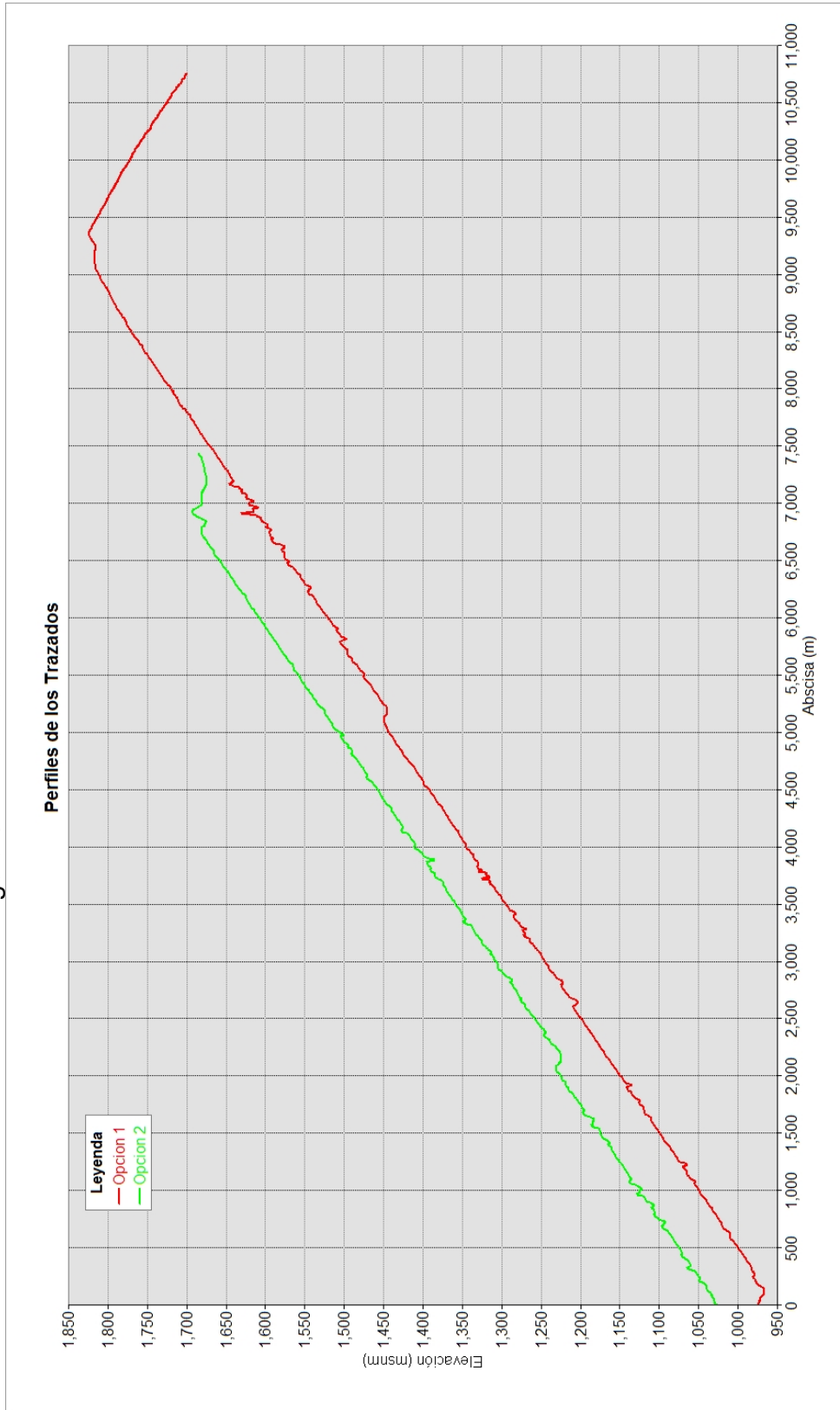
Características	Opción 1	Opción 2
Longitud (m)	10,755	7,434
Cota Inicial (msnm)	973	1025
Cota Final (msnm)	1,700	1,685
Mayor Elevación (msnm)	1,823	1,691

Figura 5-1. Esquema general de los trazados



Tomado de: Procedimiento elaborado en ArcGIS® 9.3.

Figura 5-2. Perfiles de los trazados

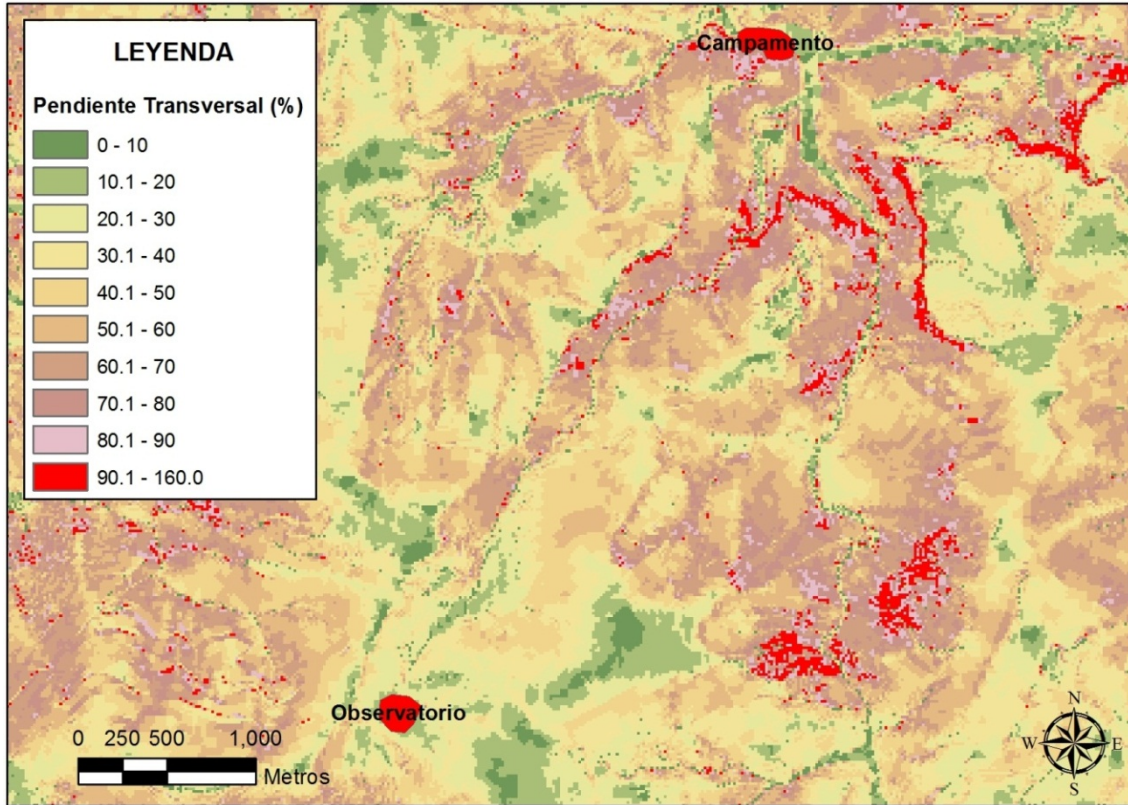


Tomado de: Procedimiento elaborado en ArcGIS® 9.3.

5.5. ANÁLISIS DE PENDIENTES TRANSVERSALES

La siguiente figura es el mapa de pendientes de la zona.

Figura 5-3. Mapa de pendientes de la zona de estudio



Tomado de: Procedimiento elaborado en ArcGIS® 9.3.

Esta pendiente fue calculada utilizando el comando *Slope* incluido en la extensión *3D Analyst*, usando como superficie de entrada un TIN creado con las curvas de nivel contenidas en los archivos de La Rioja. El comando *Slope* identifica la pendiente máxima para cada triángulo en el TIN. En dichos triángulos las pendientes máximas se presentarán perpendicularmente entre curvas adyacentes; debido a que los trazados son casi paralelos a las curvas de nivel puede decirse con seguridad, que las pendientes generadas con este procedimiento representan muy bien la pendiente perpendicular de los trazados. El tamaño de pixel de 15 m x 15 m fue el establecido por defecto por ArcGIS® y fue el usado.

El Manual de Diseño Geométrico de Carreteras de INVIAS en el capítulo 5 – Diseño de la sección transversal de la carretera, dice respecto a los taludes de corte que “la inclinación de los taludes de corte es variable a lo largo de la vía según sea la calidad y estratificación de los suelos encontrados. Los taludes en corte y en terraplén se deben diseñar de acuerdo con los lineamientos presentados en el “Manual de Estabilidad de Taludes””. Dicho manual de taludes

no establece ningún criterio respecto a la inclinación de los mismos, pero el manual de diseño geométrico si establece que “si un terraplén se debe cimentar sobre terrenos que presenten inclinaciones superiores a veinte por ciento (20%) o que estén constituidos por materiales inadecuados, se deben considerar obras especiales para minimizar los peligros de deslizamiento o de asentamientos diferenciales excesivos”.

Como en este caso no se discrimina respecto a si son de corte o terraplén, se establecerá que 20% es una pendiente que representa un umbral normal de costos y que a partir de este valor los costos se elevaran considerablemente debido a la necesidad de obras adicionales de contención y/o estabilización. De acuerdo a esto, se reclasificó la pendiente transversal de la siguiente manera:

Tabla 5-2. Valoraciones para la pendiente transversal

Pendiente Transversal (%)	Valoración (v)
0 – 10	1
10.1 – 20	1
20.1 – 30	2
30.1 – 40	3
40.1 – 50	4
50.1 – 60	5
60.1 – 70	6
70.1 – 80	7
80.1 – 90	8
90.1 – 160.0	9

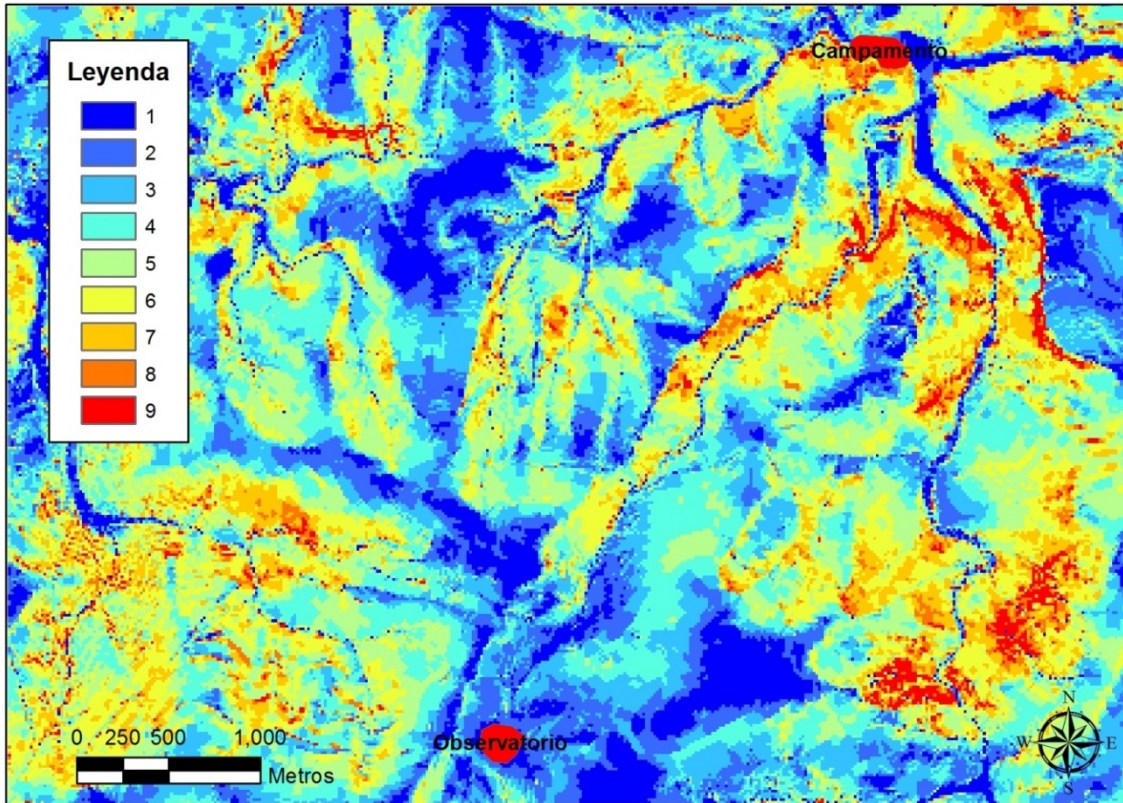
Tabla 5-3. Ancho de zona según la categoría de la carretera

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	ANCHO DE ZONA (m)
Primaria de dos calzadas	> 30
Primaria de una calzada	24 – 30
Secundaria	20 – 24
Terciaria	12

Tomado de: Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, INVIAS (2008)

Por lo tanto, la superficie reclasificada queda así:

Figura 5-4. Mapa de pendientes reclasificadas

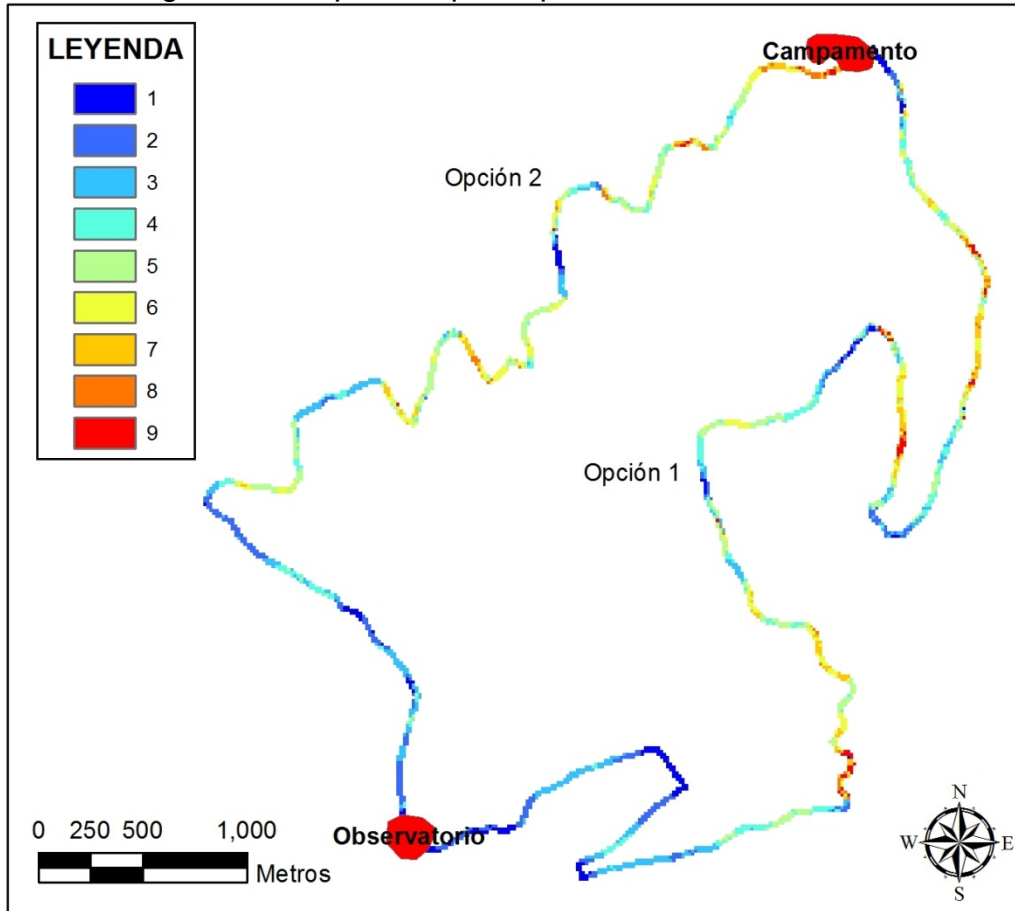


Tomado de: Procedimiento elaborado en ArcGIS® 9.3.

De acuerdo a INVIAS, el ancho de zona para una vía terciaria es de mínimo 12 metros (Tabla 5-3), este valor debe ser tomado cuando ya se tiene el eje de la vía, pero en este caso se establece un ancho de análisis de 30 metros debido a que la topografía es agreste y es necesario tener en cuenta que algunas obras en los taludes pueden extenderse más que dicho ancho de zona.

Así pues, generando los polígonos de cada trazado y extrayendo los valores no necesarios para los análisis se tiene lo siguiente:

Figura 5-5. *Clip* de mapa de pendientes reclasificadas



Tomado de: Procedimiento elaborado en ArcGIS® 9.3.

La operación *Clip* para archivos *raster* fue consultada en la página del laboratorio de GIS de *California Institute of Technology*.

La valoración total se hará haciendo la siguiente operación aritmética:

$$\text{Total} = \sum_{v=1}^9 \text{Píxeles}_v \cdot v \quad (5-1)$$

Dónde:

Píxeles: Número total de píxeles de la valoración v inscritos en el trazado
 v : Valoración

Se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 5-4. Calificación total de trazados para pendientes transversales, opción 1

TRAZADO - OPCIÓN 1 Pendientes Transversales		
Valoración	Pixeles	Calificación Parcial
1	150	150
2	190	380
3	249	747
4	233	932
5	239	1195
6	167	1002
7	124	868
8	35	280
9	49	441
Calificación Total		5995

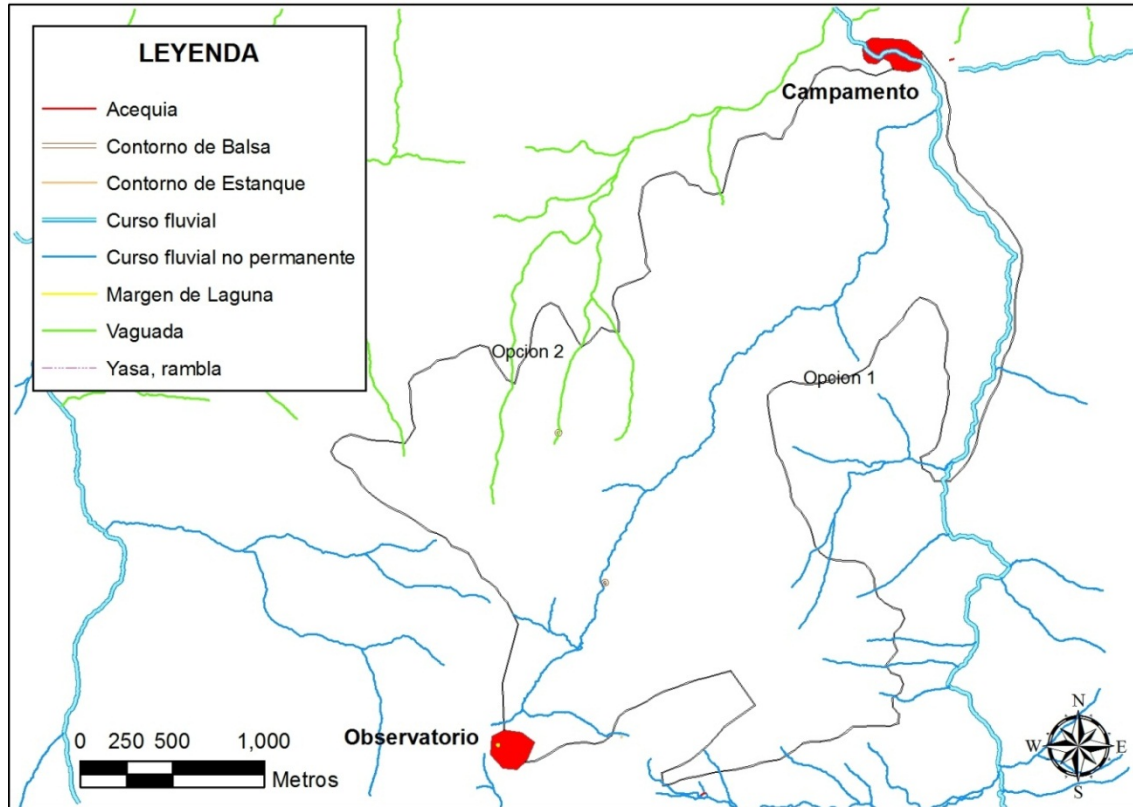
Tabla 5-5. Calificación total de trazados para pendientes transversales, opción 2

TRAZADO - OPCIÓN 2 Pendientes Transversales		
Valoración	Pixeles	Calificación Parcial
1	45	45
2	141	282
3	173	519
4	135	540
5	227	1135
6	141	846
7	70	490
8	44	352
9	11	99
Calificación Total		4308

5.6. ANÁLISIS DE ACCIDENTES HIDROGRÁFICOS

A continuación se presenta la información hidrográfica de la zona:

Figura 5-6. Mapa hidrográfico de la zona de estudio



Tomado de: Procedimiento elaborado en ArcGIS® 9.3.

La información proporciona una localización precisa de los ejes de todos los cursos fluviales y los contornos de otros tipos de accidentes hidrográficos presentes en la zona, tanto naturales como artificiales. Lamentablemente para los cursos fluviales y vaguadas no hay información acerca de sus características, tales como profundidad, ancho y caudales de drenaje, lo cual de tenerse, proporcionaría una mejor base para establecer una valoración de acuerdo al tipo de obra que podría requerirse según el caso. Por esta razón, las valoraciones en este caso serán arbitrarias, basadas en las características que dichos cursos fluviales aparentan dada su localización. Aunque esta hidrología corresponde a zonas en donde cae nieve, este factor será ignorado pues el autor nunca ha estudiado como afecta la nieve al comportamiento de los ríos y en Colombia es un factor despreciable.

Para este análisis lo que se hace es contar el número de veces que cada trazado sobrepasa los accidentes hidrográficos, se computa con su valoración y se hace la sumatoria respectiva, basados en la siguiente ecuación:

$$\text{Total} = \sum_{i=1}^8 \text{Valoración}_{\text{Característica (i)}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Característica (i)}} \quad (5-2)$$

En el programa ArcGIS se hará uso de la herramienta *select by location*, con el objetivo de seleccionar atributos de la hidrografía que se intercepten con cada trazado.

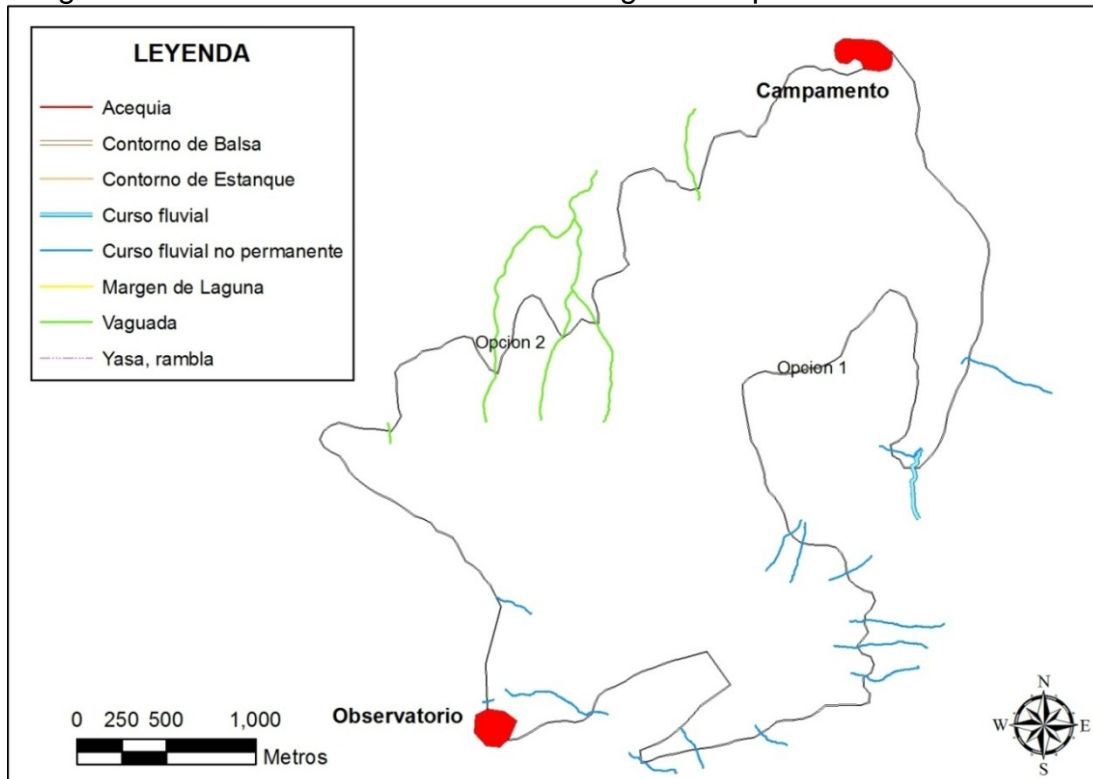
La siguiente es la tabla de valoraciones hidrográficas:

Tabla 5-6. Valoraciones para características hidrográficas

Característica hidrográfica	Valoración (v)
1. Curso fluvial	4
2. Curso fluvial no permanente	2
3. Vaguada	2
4. Yasa, Rambla	1
5. Margen de laguna	1
6. Contorno de estanque	1
7. Contorno de balsa	1
8. Acequia	1

Después de hacer la selección se obtiene lo siguiente:

Figura 5-7. Selección de accidentes hidrográficos que cruzan los trazados



Tomado de: Procedimiento elaborado en ArcGIS® 9.3.

Tabla 5-7. Calificación total de accidentes hidrográficos, opción 1

TRAZADO - OPCIÓN 1 Accidentes Hidrográficos			
Característica	Valoración	Cantidad	Calificación Parcial
1. Curso fluvial	4	1	4
2. Curso fluvial no permanente	2	12	24
3. Vaguada	2	0	0
4. Yasa, Rambla	1	0	0
5. Margen de Laguna	1	0	0
6. Contorno de estanque	1	0	0
7. Contorno de balsa	1	0	0
8. Acequia	1	0	0
Calificación Total			28

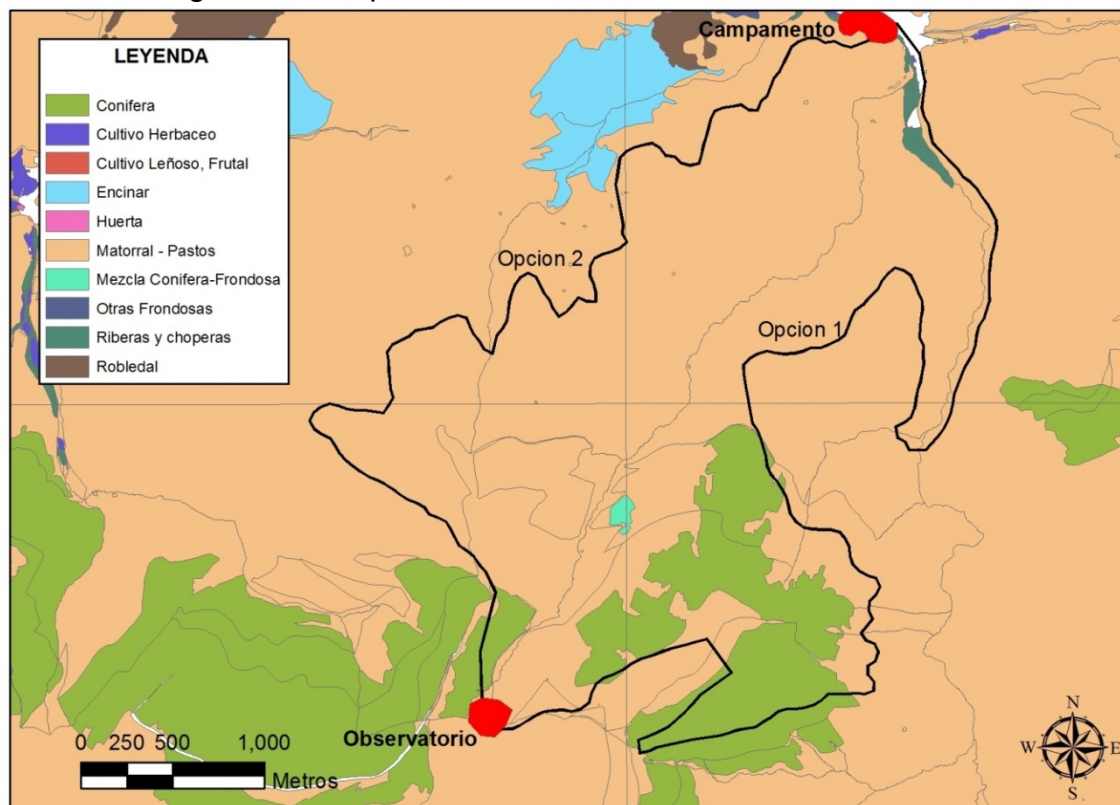
Tabla 5-8. Calificación total de accidentes hidrográficos, opción 2

TRAZADO - OPCIÓN 2 Accidentes Hidrográficos			
Característica	Valoración	Cantidad	Calificación Parcial
1. Curso fluvial	4	0	0
2. Curso fluvial no permanente	2	2	4
3. Vaguada	2	5	10
4. Yasa, Rambla	1	0	0
5. Margen de Laguna	1	0	0
6. Contorno de estanque	1	0	0
7. Contorno de balsa	1	0	0
8. Acequia	1	0	0
Calificación Total			14

5.7. ANÁLISIS DE USOS DEL SUELO

A continuación se presenta el mapa de usos del suelo:

Figura 5-8. Mapa de usos del suelo de la zona de estudio



Tomado de: Procedimiento elaborado en ArcGIS® 9.3.

Los tipos de suelo sobre los cuales se pretende construir una vía afectan notablemente su viabilidad económica, no solo por los costos directos de adquisición de predios y tierra, puesto que los gobiernos y las comunidades en muchas ocasiones exigen que se repongan de una u otra manera sus bienes perdidos y sus espacios de esparcimiento y recreación, y además ambientalmente las afectaciones de una obra lineal como esta son fuertes. Para determinar el área de cada tipo de suelo que cada trazado afecta, se utilizará un ancho de zona total de 12 metros basado en la Tabla 5-3. Con este ancho establecido se pretende encontrar la cantidad de área de cada tipo de suelo contenida en esta franja, que a su vez será multiplicada por una valoración y se obtendrán las calificaciones parciales y totales, similar a los procedimientos anteriores.

La ecuación para este caso es la siguiente:

$$\text{Total} = \sum_{i=1}^{10} \text{Area suelo } (i) \cdot \text{Valoración}_{\text{Suelo } (i)} \quad (5-3)$$

En el trazado opción 1, no se cuenta con información del suelo para los primeros 350 m, los cuales representan aproximadamente un 3.25 % del total del área a valorar. Por tal motivo y considerando que el trazado está en su mayoría sobre Matorral - Pastos se considerará que el no tener esta información no es de vital importancia y por tal motivo es razonable decir que no se afectará notablemente el resultado.

Debido a la falta de familiaridad con los temas ambientales, se utilizó como base para las valoraciones la tabla 1 del documento “Diseño de carreteras mediante un sistema de información geográfica” (GÓMEZ D., Monserrat *et al*, 1995), en la cual establecen criterios de valoración a partir de literatura revisada. Algunos tipos de suelo no eran abordados en este documento, así que se establecieron estos valores de acuerdo a lo que se conocía de los mismos y su similitud con otros presentados allí.

La siguiente es la tabla de valoraciones:

Tabla 5-9. Valoraciones para tipos de usos del suelo

Tipos de usos del suelo	Valoración
1. Cultivo Herbáceo	2
2. Cultivo Leñoso, Frutal	2
3. Huerta	2
4. Conífera	2
5. Mezcla Conífera-Frondosa	3
6. Robledal	3
7. Encinar	4
8. Otras Frondosas	3
9. Riberas y choperas	4
10. Matorral - Pastos	1

Y los resultados obtenidos son:

Tabla 5-10. Calificación total de tipos de usos del suelo, opción 1

TRAZADO - OPCIÓN 1 Tipos de usos del suelo			
Característica	Valoración	Área (m ²)	Calificación Parcial
1. Cultivo Herbáceo	2	0	0
2. Cultivo Leñoso, Frutal	2	0	0
3. Huerta	2	0	0
4. Conífera	2	29,328	58,656
5. Mezcla Conífera-Frondosa	3	0	0
6. Robledal	3	0	0
7. Encinar	4	0	0
8. Otras Frondosas	3	0	0
9. Riberas y choperas	4	0	0
10. Matorral - Pastos	1	95,703	95,703
Calificación Total			154,359

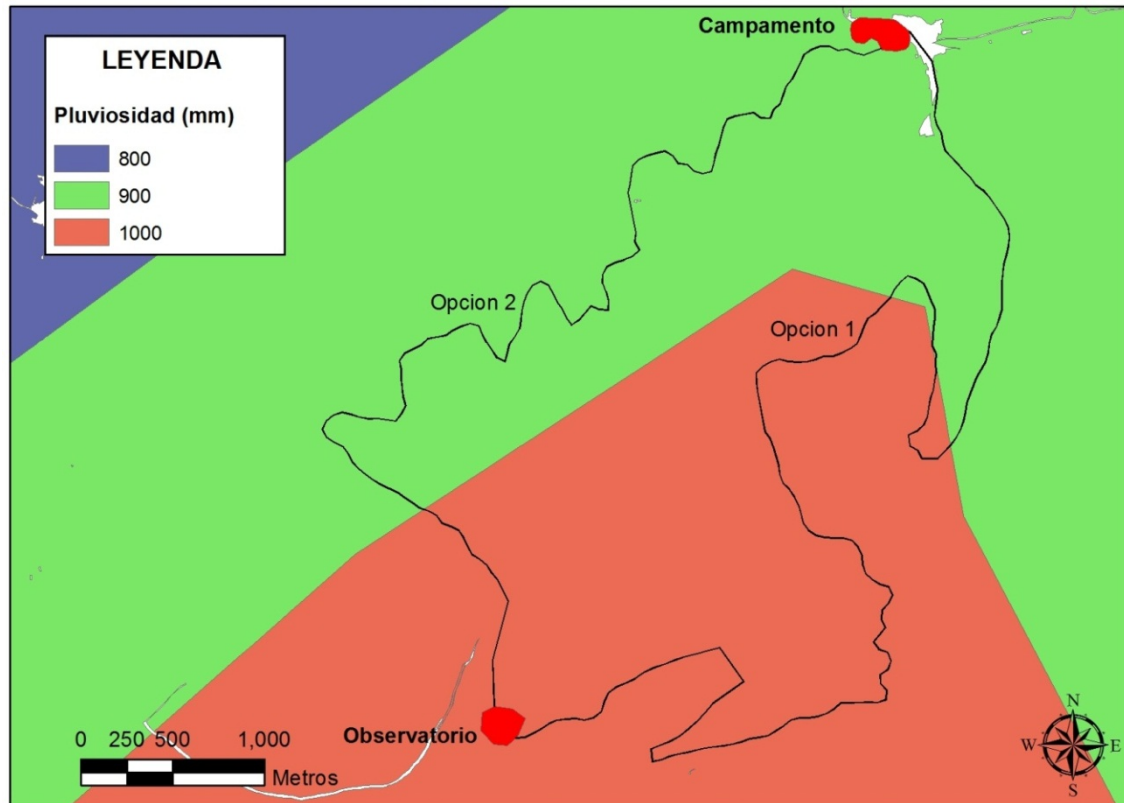
Tabla 5-11. Calificación total de tipos de usos del suelo, opción 2

TRAZADO - OPCIÓN 2 Tipos de usos del suelo			
Característica	Valoración	Área (m ²)	Calificación Parcial
1. Cultivo Herbáceo	2	0	0
2. Cultivo Leñoso, Frutal	2	0	0
3. Huerta	2	0	0
4. Conífera	2	5,398	10,796
5. Mezcla Conífera-Frondosa	3	0	0
6. Robledal	3	0	0
7. Encinar	4	0	0
8. Otras Frondosas	3	0	0
9. Riberas y choperas	4	0	0
10. Matorral - Pastos	1	83,861	83,861
Calificación Total			94,657

5.8. ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN

A continuación se presenta la información pluviométrica de la zona:

Figura 5-9. Mapa de pluviosidad de la zona de estudio



Tomado de: Procedimiento elaborado en ArcGIS® 9.3.

La precipitación a pesar de que no es un factor fundamental para la toma de decisiones en un trazado de una vía, si afectan económicamente el proyecto en términos de obras de captación y evacuación de aguas de escorrentía, y mantenimientos debidos a la mayor probabilidad de deslizamientos, y además se impacta el componente de seguridad y comodidad de los usuarios que usaran la vía.

Para simplificar el ejercicio y debido a que no se tienen los perfiles para el análisis de áreas tributarias, se tomara solo la longitud correspondiente a cada nivel de precipitación. En este caso la valoración estará dada en función de la cantidad de pluviosidad en milímetros multiplicada por la distancia correspondiente de cada trazado. Nuevamente, no se cuenta con la información para los primeros 350 del trazado opción 1, pero debido a la forma como son elaborados los polígonos de pluviosidad y a la forma general de la Figura 5-9 se puede decir con toda seguridad que corresponden a una pluviosidad de 900 mm.

Para este procedimiento se usó la herramienta de análisis *identity* contenida en *ArcToolbox*.

De acuerdo a lo establecido anteriormente se tiene los siguientes resultados:

Tabla 5-12. Calificación total de pluviosidad, opción 1

TRAZADO - OPCIÓN 1 Pluviosidad		
Pluviosidad (mm)	Longitud (m)	Calificación Parcial
800	0	0
900	3,205	2,884,500
1,000	7,550	7,550,000
Calificación Total		10,434,500

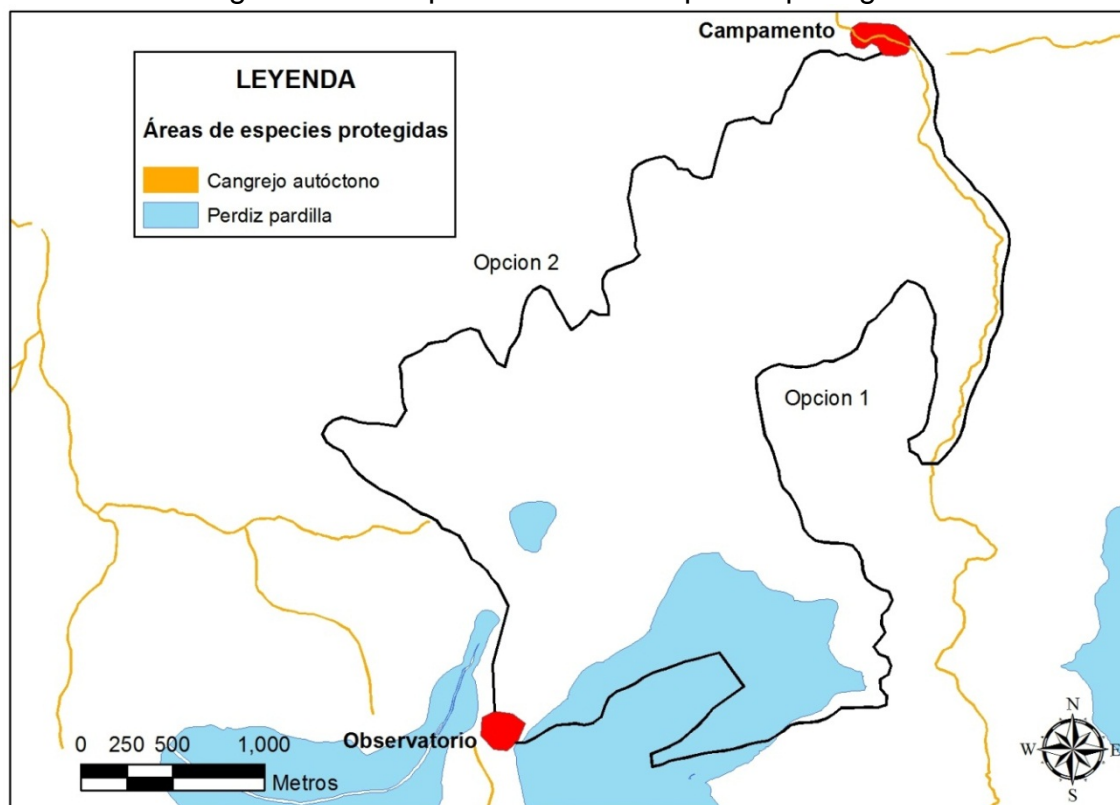
Tabla 5-13. Calificación total de pluviosidad, opción 2

TRAZADO - OPCIÓN 2 Pluviosidad		
Pluviosidad (mm)	Longitud (m)	Calificación Parcial
800	0	0
900	6,142	5,527,800
1,000	1,292	1,292,000
Calificación Total		6,819,800

5.9. ANÁLISIS DE ESPECIES PROTEGIDAS

A continuación se presentan las áreas de especies protegidas de la zona:

Figura 5-10. Mapa de áreas de especies protegidas



Tomado de: Procedimiento elaborado en ArcGIS® 9.3.

Según Decreto 2820 de 2010 por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales, en su Artículo 9º numeral 7, los proyectos de la red vial secundaria y terciaria están sujetos a tramitar una licencia ambiental ante la respectiva autoridad ambiental. Es por esto, que “un diseño óptimo de cualquier infraestructura debe considerar, junto con los costes de construcción, los ambientales” (GÓMEZ D., Monserrat *et al*, 1995).

Como se percibe en la Figura 5-10 el trazado opción 2 no afecta ninguna de las áreas de especies protegidas, así que solo se hace un análisis del trazado opción 1 indagando acerca de la cantidad de área afectada con un ancho de zona de vía total de 12 metros (Tabla 5-3), similar al procedimiento usado para el análisis de usos de suelo. Las valoraciones serán unitarias puesto que no se tiene ningún conocimiento técnico respecto a la gravedad de la afectación.

Tabla 5-14. Calificación total de áreas de especies protegidas, opción 1

TRAZADO - OPCIÓN 1 Áreas de especies protegidas			
Especie	Valoración	Área (m2)	Calificación Parcial
Cangrejo autóctono	1	132	132
Perdiz pardilla	1	35096	35096
Calificación Total			35228

Tabla 5-15. Calificación total de áreas de especies protegidas, opción 2

TRAZADO - OPCIÓN 2 Áreas de especies protegidas			
Especie	Valoración	Área (m2)	Calificación Parcial
Cangrejo autóctono	1	0	0
Perdiz pardilla	1	0	0
Calificación Total			0

5.10. OTROS ANÁLISIS

En cuanto a otros análisis que pueden ser realizados con información adicional, como mapas geológicos, catastrales, costos prediales y estructuras existentes, por mencionar algunos, se considera que pueden ser analizados utilizando alguna de las metodologías ya explicadas en este capítulo. No obstante, cada proyecto es único e irreplicable, y dependiendo de las necesidades del diseñador, se deben establecer criterios y metodologías de trabajo según sea necesario.

5.11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez finalizado el estudio individual de cada característica es necesario sintetizar la información obtenida para la toma de una decisión. Debido a la alta variabilidad de los resultados de las diferentes características, principalmente por las diferencias en las unidades de medida utilizadas, se hace una normalización en términos del menor valor de cada rasgo analizado, es decir, cada calificación total será dividida por la menor de las dos; el objetivo es tener valores consistentes para la evaluación final de las alternativas. Posteriormente, las calificaciones normalizadas son ponderadas de acuerdo a la importancia que el autor considere afectan el diseño de un nuevo corredor vial y se obtiene una valoración final de la siguiente manera:

Tabla 5-16. Análisis final de resultados

ANÁLISIS DE RESULTADOS - TRAZADOS					
Característica	Ponderación	Calificación Trazado Opción 1	Calificación Trazado Opción 2	Calif. Normalizada Trazado Opción 1	Calif. Normalizada Trazado Opción 2
1. Longitud	20%	10,755	7,434	1.45	1.00
2. Pendientes Transversales	30%	5,995	4,308	1.39	1.00
3. Hidrografía	20%	28	14	2.00	1.00
4. Usos del Suelo	20%	154,359	94,657	1.63	1.00
5. Pluviosidad	10%	10,434,500	6,819,800	1.53	1.00
Promedio Ponderado				1.59	1.00

A partir de esta última tabla, es posible decir con toda confianza que el trazado que presenta las mejores características para ser desarrollado, de acuerdo con los parámetros analizados, es la opción 2.

6. CONCLUSIONES

En Colombia el acceso a información apropiada para el análisis de nuevos trazados es difícil, debido a diferentes situaciones técnicas y económicas han dificultado la divulgación y popularización en el uso de este tipo de tecnología. Esta situación hace que obtener la información necesaria tome mucho tiempo y sea costoso, sumado a que los profesionales del sector aún están en proceso de capacitación para el uso de software SIG. Es importante establecer políticas tendientes al uso de estas tecnologías en empresas públicas y privadas; a medida que todos aporten información, la misma cada vez será más económica y de mejor calidad contribuyendo a la creación de una base de datos nacional con los mejores estándares, mostrando una actitud de transparencia de la industria y el gobierno con los ciudadanos.

La correcta utilización de los medio electrónicos ha permitido a los profesionales la agilización de procesos, la minimización de errores y las fáciles correcciones en los procesos de diseño, y la ingeniería de carreteras no puede ser la excepción. Con procedimientos como los demostrados aquí se plantean alternativas para que cada día se avance en el mejoramiento de la calidad y ahorro de recurso y tiempo.

La herramienta Trazado SIG garantiza al diseñador que su trazado cumple en todo momento con la pendiente longitudinal, un factor muy importante para asegurar el adecuado nivel de servicio en topografías montañosas y escarpadas.

Es importante mencionar que para desarrollar más herramientas de este tipo y principalmente con miras a mejorar la calidad y las funcionalidades de la herramienta Trazado SIG, es necesario capacitarse de manera directa con la compañía creadora del software ArcGIS, ESRI, o con alguien con un nivel avanzado en métodos de programación de este software. Esta inversión proporcionaría mejores bases para proporcionar desarrollos de mejora calidad en un menor tiempo.

7. RECOMENDACIONES

La programación de la herramienta Trazado SIG requirió mucho más trabajo investigativo del esperado para lograr que este instrumento fuera lo suficientemente útil y cumpliera con los objetivos planteados al inicio de este documento. Hay muchos lenguajes de programación que pueden ser aplicados al software ArcGIS, pero el mayor problema radica en la difícil lógica en la interacción entre el lenguaje de programación elegido con los comandos propios del software, sumado a la poca documentación asequible dentro de los costos normales de un proyecto de esta naturaleza. Por lo tanto y como en todo proyecto siempre existen aspectos sujetos a ser reanalizados y perfeccionados. A continuación se enumeran los principales puntos por mejorar:

- Reconocimiento de la elevación de las curvas de nivel durante el proceso de trazado, para lograr automatizar la creación de cada segmento de línea de acuerdo con la pendiente establecida, similar al trabajo de (ROGERS, Luke, 2001).
- Creación automática de archivo *Shape* cada vez que se proceda a hacer un nuevo trazado.
- Evitar la pérdida de la longitud de segmento de línea establecida de acuerdo a la pendiente cuando se usa el comando deshacer.
- El objetivo a largo plazo es hacer el procedimiento tan automatizado, que el único requerimiento del usuario es establecer puntos de salida y llegada, y definir la velocidad y categoría de la vía.

BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO O., John Jairo. Diseño Computarizado de Carreteras. 1ª Edición. Medellín: Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2008. 346 p. + Software VÍAS. ISBN: 978-958-720-023-3

_____. Diseño Computarizado de Vías. Tercera Edición. Medellín: Centro de Publicaciones Universidad EAFIT, 2004. 324 p. ISBN: 958-33-3889-3

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO), Elements of Design, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 5ª Edición, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 109 - 299 p. capítulo: 3, Washington, D.C., Estados Unidos de América, 2004. ISBN: 1-56051-263-6

AMIRUDDIN, Deprizon *et al.* Expert System For Highway Geometric Design Using GIS. En: EASTS International Symposium On Sustainable Transportation (Agosto de 2008: Johor, Malasia). Memorias de EASTS International Symposium On Sustainable Transportation. Johor, Malasia: Eastern Asia Society For Transportation Studies, 2008. p. 8

ANDREW U., Frank y WALLACE, Mark. Constraint Based Modeling In A GIS: Road Design As A Case Study. En: XII International Symposium on Computer-Assisted Cartography (Febrero de 1995: Charlotte, North Carolina, Estados Unidos de América). ACSM / ASPRS Anual Convention & Exposition: Technical Papers. Bethesda, Maryland, Estados Unidos de América: American Congress on Surveying and Mapping & American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1995. p. 177 – 186

California Institute of Technology. "Clip" a GRID using a Polygon Shapefile. Documento PDF, <<http://www.gps.caltech.edu/gislab/howto/docs/ClipGrids.pdf>> [citado: Marzo de 2011]

CÁRDENAS G., James. Diseño Geométrico de Vías. 2ª Edición. Santa Fe de Bogotá, D.C.: Universidad del Valle - Ecoe ediciones, 2000. 319 p. ISBN: 958-648-052-6

CHENG, Min-Yuan y CHANG, Guey-Lin. Automating Utility Route Design And Planning Through GIS. En: Automation in Construction, Vol. 10, No. 4. p. 507 - 516. ISSN: 0926-5808

DESCONOCIDO. FreeVBCode - High Quality Visual Basic and C# Source Code. Página Web, <<http://www.freevbcode.com/>> [citado: Enero de 2011]

DESCONOCIDO. Visual Basic 6 (VB6) - Tutorials And Source Code Samples. Página Web, <<http://www.vb6.us/>> [citado: Diciembre de 2010]

ESRI. ESRI Developer Network - Discussion Forums. Foro Virtual, <<http://edn.esri.com/index.cfm?fa=forums.gateway>> [citado: Diciembre de 2010]

_____. The GIS Software Leader. Página Web, <<http://www.esri.com/>> [citado: Octubre 20 de 2010]

EUGENCHOL, Kim *et al.* Improving the computational efficiency of highway alignment optimization models through a stepwise genetic algorithms approach. En: Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 39, No. 4. p. 339-360. ISSN: 0191-2615

GOBIERNO DE LA RIOJA, España. Infraestructura de Datos Espaciales - Gobierno de La Rioja - IDERIOJA. Página Web, <http://www.iderioja.larioja.org/cartografia/index.php?map=RIOJA_TEMATICA&&lang=es> [citado: Diciembre de 2010]

GÓMEZ D., Monserrat *et al.* Diseño De Carreteras Mediante Un Sistema De Información Geográfica: Costes De Construcción y Costes Ambientales. En: Ciudad y Territorio, Vol. III, No. 104. p. 361-376. ISSN: 1133-4762

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (Colombia). República de Colombia - Ministerio de Transporte, Manual de Diseño Geométrico de Carreteras, Manual Electrónico, Acceso: Septiembre 27 de 2010. <http://www.invias.gov.co/invias/hermesoft/portallG/home_1/recursos/01_general/dokumentos/02042009/manual_diseno_geometrico.zip>

MANOJ K., Jha y SCHONFELD, Paul. A Highway Alignment Optimization Model Using Geographic Information Systems. En: Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 38, No. 6. p. 455 - 481. ISSN: 0965-8564

MILLER, Harvey J. y SHAW, Shih-Lung. Geographic information systems for transportation: principles and applications. 1ª Edición. Oxford University Press, 2001. 458 p. ISBN: 9780195123944

PÉREZ DE MADRID, Pedro Aliseda *et al.* AEPO, Ingenieros Consultores S.A., Sistemas de Información Geográfica Aplicados a Carreteras, Artículo, Acceso: Septiembre 24 de 2010. <www.aepo.es/aepo-old/ausc/publ/giscarreteras.pdf>

ROGERS, Luke y SCHIESS, Peter. PEGGER & ROADVIEW - A New GIS Tool To Assist Engineers In Operations Planning. En: The International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium (2001: Seattle, Washington,

Estados Unidos de América). Memorias de The International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium University of Washington, 2001. p. 177 – 182

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Geographic Information Systems. Página Web, <http://egsc.usgs.gov/isb/pubs/gis_poster/> [citado: Octubre 19 de 2010]

URRIOLA P., Ricardo Alberto *et al.* Selección De La Ruta Óptima Para El Trazado De Una Carretera Mediante Un Sistema De Información Geográfica (SIG): Ruta Las Gonzáles - Estanques. Mérida, Venezuela, 2002, 12 h. Tesis de Grado (Postgrado de Ingeniería Vial). Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería