



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN.**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“ANÁLISIS CRÍTICO DE SUSTENTABILIDAD EN EL  
DISEÑO DE CARRETERAS”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.**

**AUTOR: JEAN PIERRE BALAREZO APOLINARIO, ANDRES GONZALO  
AVILA ORTIZ**

**DIRECTOR: MSC. ING. CESAR HUMBERTO MALDONADO NOBOA.**

**CUENCA - ECUADOR**

**2021**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,  
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN.**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.**

**ANÁLISIS CRÍTICO DE SUSTENTABILIDAD EN EL DISEÑO DE  
CARRETERAS.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL.**

**AUTOR: JEAN PIERRE BALAREZO APOLINARIO, ANDRES GONZALO  
AVILA ORTIZ.**

**DIRECTOR: MSC. ING. CESAR HUMBERTO MALDONADO NOBOA.**

**CUENCA - ECUADOR**

**2021**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

**Jean Pierre Balarezo Apolinario** y **Andres Gonzalo Ávila Ortiz** portadores de las cédulas de ciudadanía N.º 0706271285 y 0107082877. Declaramos ser autores de la obra: **“Análisis Crítico de Sustentabilidad en el Diseño de Carreteras”**, sobre la cual nos hacemos responsables sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaramos que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaramos finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, **13 de octubre de 2021**

F:   
Jean Pierre Balarezo Apolinario.  
0706271285

F:   
Andres Gonzalo Ávila Ortiz.  
0107082877



**CERTIFICACIÓN.**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los estudiantes, Jean Pierre Balarezo Apolinario y Andres Gonzalo Ávila Ortiz, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal dotted line. The signature is stylized and appears to read 'Cesar Humberto Maldonado Noboa'.

MSc. Ing. Cesar Humberto Maldonado Noboa.



## **DEDICATORIAS**

Dedico el presente trabajo con mucho amor a mis padres, quienes fueron los que aportaron con gran esfuerzo a formarme como profesional y me demostraron que el amor a la familia siempre es primero.

También va dedicado para mi hermana que es mi principal inspiración para cumplir mis metas y desarrollarme como persona, a mis abuelos que, con sus experiencias, consejos y demostraciones de amor siempre lograron tranquilizarme para poder seguir en mis estudios.

Finalmente, una dedicatoria con mucho cariño al resto de mi familia y amigos que siempre me enviaron mensajes de apoyo y con buenos deseos.

**JEAN PIERRE BALAREZO APOLINARIO.**

Dedico este trabajo a todos los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil. A los Ingenieros Civiles del Ecuador, esperando que este trabajo sirva para fortalecer los conocimientos referentes al diseño geométrico de Carreteras

**ANDRES GONZALO AVILA ORTIZ.**



## AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por permitirme cumplir uno de mis sueños, también agradezco a mis queridos padres y abuelos por apoyarme en este largo trayecto educativo, de igual forma a mi círculo de amistad y compañeros que aportaron para poder crecer en el ámbito profesional y personal.

Por último, agradezco de manera cordial a la Universidad Católica de Cuenca y a mis profesores, ya que gracias a sus enseñanzas y consejos no han inculcado valores que nos permitirán ser profesionales y líderes que aportemos al progreso de la sociedad.

**JEAN PIERRE BALAREZO APOLINARIO.**

Agradezco a mis padres quienes me apoyaron durante todo este camino. A mi abuelita Noemi que me alentó siempre para continuar, cuando parecía que me iba a rendir. A mi tío Gilberto que fue el que me impulsó a seguir esta carrera y me apoyó en el proceso. A mi tutor, el Ing. Cesar Maldonado quien estuvo presente en todos los años de mi carrera. A todos los que me apoyaron para escribir y concluir esta tesis.

**ANDRES GONZALO AVILA ORTIZ.**



## RESUMEN

En los últimos años, se ha insertado el concepto sustentabilidad en diferentes procesos de desarrollo, entre ellos la movilidad, el transporte y la construcción de proyectos. Una carretera parte del diseño geométrico, en esta etapa se consideran los criterios que permitan fomentar proyectos que aporten y promuevan índices de sustentabilidad.

El presente trabajo de titulación está basado en un análisis de la bibliografía referente a la sustentabilidad aplicada a carreteras, criterios generales establecidos y generados por distintas organizaciones internacionales que promueven las carreteras sustentables, tales como; Green Roads, FHWA (Federal Highway Administration), ERF (Federación de Carreteras de la Unión Europea) ; con lo que, los autores han introducido criterios de sustentabilidad para los componentes técnico, ambiental, económico, social y de seguridad en el componente de Diseño de carreteras.

La presente investigación logró identificar criterios de sustentabilidad que deben analizarse en el Diseño Geométrico de carreteras, tanto de los factores externos como de los factores internos que participan en el Diseño, direccionando el estudio a vías de características y jerarquía importante como son vías arteriales.

Los criterios generados se condicionaron por los componentes ambientales, económicos, sociales, técnicos y de seguridad en las carreteras, también por la tipología del terreno natural, que es el factor externo que los autores definieron como el de mayor impacto.

La investigación concluye que es posible aplicar criterios de sustentabilidad en el Diseño Geométrico de carreteras, lo que puede ser analizado y generar criterios para vías de menor jerarquía o ubicación.

*Palabras clave:* carreteras sustentables, componentes técnicos, diseño geométrico, criterios sustentables



## ABSTRACT

In recent years, the concept of sustainability has been inserted into different development processes, including mobility, transportation, and construction projects. A road is part of the geometric design, in this stage the criteria that allow the promotion of projects that contribute and promote sustainability indexes are considered. This thesis is based on an analysis of the literature on sustainability applied to roads, general criteria established and generated by various international organizations that promote sustainable roads, such as Green Roads, FHWA (Federal Highway Administration), ERF (European Road Federation), with which the authors have introduced sustainability criteria for the technical, environmental, economic, social and safety components in the road design component. Similarly, through this research it was possible to identify sustainability criteria that should be analyzed in the Geometric Design of Roads, both external and internal factors that participate in the Design, directing the study to roads of important characteristics and hierarchy such as arterial roads. The criteria generated were conditioned by the environmental, economic, social, technical, and safety components of the roads, as well as by the typology of the natural terrain, which is the external factor that the authors defined as having the greatest impact. The research concludes that it is possible to apply sustainability criteria in the Geometric Design of roads, which can be analyzed and generate criteria for roads of lower hierarchy or location.

*Keywords:* sustainable roads, technical components, geometric design, sustainable criteria



ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD..... 1

CERTIFICACIÓN. .... 2

DEDICATORIAS ..... 3

AGRADECIMIENTOS..... 4

RESUMEN ..... 5

ABSTRACT ..... 5

LISTA DE TABLAS..... 11

LISTA DE FIGURAS..... 11

OBJETIVOS ..... 13

    GENERAL..... 13

    ESPECÍFICOS..... 13

1  CAPÍTULO PRIMERO. ANTECEDENTES..... 14

    1.1  Generalidades de Carreteras. .... 14

    1.2  Niveles de servicio de carreteras..... 14

        1.2.1  Factores Internos o Externos que afectan el nivel de servicio..... 16

    1.3  Clasificación de Carreteras..... 17

        1.3.1  Clasificación por capacidad vial en función del Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA)..... 18

        1.3.2  Clasificación según desempeño de las carreteras. .... 19

        1.3.3  Clasificación Funcional por importancia en la red vial. .... 21

        1.3.4  Clasificación según las condiciones orográficas..... 22

        1.3.5  Clasificación según el número de calzada ..... 23

        1.3.6  Clasificación de acuerdo a la Superficie de Rodamiento. .... 24

    1.4  Proyecto carretero. .... 26

        1.4.1  Fases del proyecto..... 26



1.4.1.1	FASE 1: Prefactibilidad. ....	26
1.4.1.2	FASE 2: Factibilidad .....	28
1.4.1.3	FASE 3: Diseños definitivos. ....	29
2	<b>CAPITULO SEGUNDO. SUSTENTABILIDAD EN CARRETERAS.....</b>	<b>30</b>
2.1	<b>El Origen de la Sustentabilidad .....</b>	<b>30</b>
2.1.1	<b>La Agenda del 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....</b>	<b>32</b>
2.2	<b>Desarrollo Sustentable.....</b>	<b>35</b>
2.3	<b>Carreteras Sustentables (Introducción al concepto, ejemplificación con carreteras ERF, Carreteras Verdes, y FHWA).....</b>	<b>37</b>
2.3.1	<b>Carreteras sustentables (ERF) .....</b>	<b>38</b>
2.3.1.1	<b>Diseño y planeación de carreteras .....</b>	<b>38</b>
2.3.1.2	<b>Construcción, operación y conservación de las carreteras .....</b>	<b>39</b>
2.3.1.3	<b>Financiamiento de la sustentabilidad.....</b>	<b>41</b>
2.3.2	<b>Carreteras verdes (Greenroads).....</b>	<b>42</b>
2.3.2.1	<b>Requerimientos del proyecto .....</b>	<b>43</b>
2.3.2.2	<b>Medio ambiente y agua.....</b>	<b>46</b>
2.3.2.3	<b>Acceso y equidad .....</b>	<b>47</b>
2.3.2.4	<b>Materiales y recursos .....</b>	<b>48</b>
2.3.2.5	<b>Tecnología en pavimentos .....</b>	<b>49</b>
2.3.3	<b>Carreteras sustentables (FHWA).....</b>	<b>50</b>
2.4	<b>Componentes de la Sustentabilidad en las Carreteras (Componente económico, social, técnico, ambiental, seguridad).....</b>	<b>51</b>
2.4.1	<b>Componente Económico.....</b>	<b>52</b>
2.4.2	<b>Componente Social .....</b>	<b>55</b>
2.4.3	<b>Componente Técnico. ....</b>	<b>58</b>
2.4.4	<b>Componente Ambiental .....</b>	<b>63</b>
2.4.5	<b>Componente Seguridad .....</b>	<b>66</b>



**3 CAPITULO TERCERO. SUSTENTABILIDAD EN DISEÑO**

**GEOMÉTRICO..... 67**

**3.1 Factores que intervienen en el Diseño Geométrico y Sustentabilidad ..... 67**

**3.1.1 Factores Externos y Sustentabilidad..... 68**

**3.1.1.1 Topografía del terreno natural..... 68**

**3.1.1.2 Conformación Geológica y Geotécnica ..... 69**

**3.1.1.3 Características del tránsito actual y futuro ..... 69**

**3.1.1.4 Impactos Ambientales ..... 70**

**3.1.1.5 Climatología..... 70**

**3.1.1.6 Planes de desarrollo y ordenamiento territorial y Planes de uso y gestión del suelo ..... 70**

**3.1.2 Factores Internos y Sustentabilidad ..... 71**

**3.1.2.1 Velocidad ..... 71**

**3.1.2.2 Radio ..... 72**

**3.1.2.3 Pendientes ..... 73**

**3.1.2.4 Peralte ..... 74**

**3.2 Diseño Geométrico Horizontal y Sustentabilidad..... 74**

**3.2.1 Línea de Ceros y selección de rutas Sustentables ..... 75**

**3.2.2 Ajuste de línea de Ceros Sustentable ..... 75**

**3.2.3 Diseño horizontal Sustentable ..... 76**

**3.3 Diseño Geométrico Vertical y Sustentabilidad..... 78**

**3.3.1 Elementos Geométricos que Integran el Alineamiento vertical. .... 78**

**3.3.2 Distancias de Visibilidad ..... 79**

**3.3.3 Diseño vertical Sustentable ..... 81**

**3.4 Diseño Geométrico Transversal..... 82**

**3.4.1 Secciones transversales..... 83**

**3.4.2 Número y ancho de carriles. .... 84**

**3.4.3 Volumen de tierra y Diagrama de Masas. .... 84**



<b>4</b>	<b>CAPITULO CUARTO. SEGURIDAD EN EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS Y SU RELACIÓN CON LA SUSTENTABILIDAD. ....</b>	<b>87</b>
4.1	Señalización horizontal.....	88
4.2	Señalización Vertical .....	89
4.2.1	Señales reglamentarias.....	89
4.2.2	Señales preventivas.....	90
4.2.3	Señales informativas.....	90
4.3	Infraestructura de seguridad.....	91
<b>5</b>	<b>CAPITULO QUINTO. ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS ACCIONES DENTRO DE LAS FASES DEL DISEÑO GEOMETRICO VIAL DE CARRETERAS SUSTENTABLES.....</b>	<b>97</b>
5.1	Criterios .....	98
5.1.1	Criterio 1: Radio Mínimo .....	98
5.1.2	Criterio 2: Uso de la Pendiente Longitudinal Máxima. ....	99
5.1.3	Criterio 3: Distancia de Visibilidad en Curvas. ....	101
5.1.4	Criterio 4: Entre tangencias con distancia de visibilidad para adelantamiento. ....	103
5.1.5	Criterio 5: Curvas verticales en cresta, convexas. ....	105
5.1.6	Criterio 6: Relación Corte-Relleno. ....	106
5.1.7	Criterio 7: Secciones recomendadas. ....	108
5.1.8	Criterio 8: Estructuras de seguridad y señaléticas en curvas. ....	109
5.1.9	Criterio 9: Estructuras de seguridad y señaléticas “Radares”.....	110
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>112</b>
6.1	CONCLUSIONES.....	112
6.2	RECOMENDACIONES.....	113
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>114</b>



**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Niveles de servicio de una carretera..... 16

Tabla 2: Clasificación Funcional de las vías en base al TPDA ..... 18

Tabla 3: Clasificación Funcional por importancia en la red Vial..... 22

Tabla 4: Clasificación según las condiciones orográficas..... 22

Tabla 5 Principales Acontecimientos sobre Sustentabilidad a lo largo de la historia. ... 33

Tabla 6: Condiciones de lecho de frenado..... 96

Tabla 7. Porcentaje de curvas con Radios mínimos. .... 98

Tabla 8. Porcentaje de pendientes longitudinales máximas. .... 100

Tabla 9. Porcentaje de longitud de visibilidad en curvas. .... 102

Tabla 10. Porcentaje mínimo de entretangencias que permitan rebasar..... 103

Tabla 11. Porcentaje máximo del número de curvas verticales en cresta críticas. .... 105

Tabla 12. Relaciones porcentuales Corte-Relleno propuestas..... 107

Tabla 13. Secciones Propuestas..... 108

Tabla 14. Longitud de colocación de señales de tránsito. .... 109

Tabla 15. Cantidad de Radares. .... 110

**LISTA DE FIGURAS**

Ilustración 1: Camino Agrícola/Forestal. .... 19

Ilustración 2: Camino Básico. .... 19

Ilustración 3: Carreteras Convencionales Básicas..... 20

Ilustración 4: Carreteras de Mediana Capacidad..... 20

Ilustración 5: Vías de alta capacidad Interurbana..... 20

Ilustración 6: Vías de alta capacidad Urbana o Periurbana. .... 21

Ilustración 7: Clasificación según el número de calzada..... 23

Ilustración 8. Carretera de calzada única..... 23

Ilustración 9: Distribución de esfuerzos en pavimentos flexible..... 24

Ilustración 10: Distribución de esfuerzos en pavimentos Rígidos. .... 24

Ilustración 11: Terreno afirmado..... 25

Ilustración 12: Superficie Natural..... 25

Ilustración 13. Criterios de Sustentabilidad para Carreteras. .... 36

Ilustración 14: Sumideros de Carbono. .... 41

Ilustración 15. Tangente Vertical. .... 79



Ilustración 16: Secciones Transversales según el corte y relleno.....	83
Ilustración 17. Diagrama de Masas. ....	85
Ilustración 18: Tachas reflectivas. ....	91
Ilustración 19: Tachas reflectivas. ....	92
Ilustración 20: Tachones Bidireccionales.....	92
Ilustración 21. Estoperol vial.....	93
Ilustración 22: Amortiguador sin capacidad de redireccionamiento.....	94
Ilustración 23: Amortiguadores de redireccionamiento. ....	94
Ilustración 24. Amortiguadores móviles. ....	94
Ilustración 25. Lecho de frenado. ....	95



## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

- Realizar un análisis crítico de las etapas del Diseño Geométrico Vial, identificando los factores que afectan la Sustentabilidad en Carreteras.

### **ESPECÍFICOS**

- Analizar los conceptos del Diseño Geométrico de Carreteras, sus etapas y los procesos.
- Determinar los factores del Diseño Geométrico que afectan la sustentabilidad en carreteras.
- Cuantificar y calificar los factores de diseño para obtener Diseños Geométricos de carreteras Sustentables.



## 1 CAPÍTULO PRIMERO. ANTECEDENTES

### 1.1 Generalidades de Carreteras.

Desde la prehistoria, los seres humanos han tenido la necesidad de interactuar entre ellos; motivo que ha fomentado la construcción de carreteras, puesto que son estructuras que permiten el traslado de las personas y de las mercancías de forma rápida y eficiente, mediante los diversos medios de transporte.

La inserción de carreteras en el territorio es de vital importancia ya que permite el desarrollo económico, en la medida que conecta los puntos de producción y consumo. Es por ello que, la apertura de vías mediante un proyecto carretero beneficia a los habitantes del área de emplazamiento tanto en su arista económico, social, cultural y político.

Los proyectos carreteros requieren de la participación de un grupo de profesionales multidisciplinarios, puesto que la intervención implica el estudio de diferentes áreas o ramas, ya sean estas de conducción de fluidos, resistencia de materiales, proyecciones, estudio de tráfico, diseño de pavimentos, ambientales, estructurales, entre otros.

Bajo la necesidad de ejecutar vías cómodas y seguras, se ha implementado diversos métodos constructivos para las capas de rodaduras; iniciando desde superficies a base de piedras y aglomerante, hasta los pavimentos flexibles y/o rígidos. Cabe destacar la transición de las ideas primitivas hacia los esfuerzos científicos en cuanto al estudio de las características viales óptimas, con la única finalidad de mejorar la calidad de vida de los usuarios.

### 1.2 Niveles de servicio de carreteras.

El nivel de servicio es uno de los factores que evalúa el funcionamiento operacional y define la capacidad que la carretera posee para mejorar el tráfico. La capacidad se basa en dos criterios: flujo ininterrumpido y flujo interrumpido. El tráfico ininterrumpido es



característico de carreteras rurales, donde las comunidades aún no están desarrolladas y en autopistas que tienen ingresos en tramos largos. El segundo criterio hace referencia a centros poblados e ingreso de tráfico pesado (Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, 2012).

De acuerdo a Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2012), Highway Capacity Manual (HCM) define a la capacidad como, “el máximo número de vehículos que puede pasar por una sección dada de un carril o de una carretera (en el caso de las carreteras de dos o n carriles durante un periodo de tiempo dado bajo las condiciones prevalecientes del tránsito y de la carretera”.

En otras palabras, esta definición permite entender que, si el volumen de tráfico en una carretera es menor a su capacidad, los conductores podrán transitar de forma cómoda y ligera. No obstante, si el volumen de tráfico supera el valor de la capacidad se generará problemas en el tránsito, provocando lo que se conoce como congestión vehicular.

Considerando la definición presentada por Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2012), los niveles de servicio de una carretera tiene una calificación cualitativa, misma que evalúa criterios indispensables tales como la velocidad media, el tiempo de viaje, libertad de maniobra y la seguridad.

Además, los niveles de servicio están evaluados mediante una jerarquía de letras, siendo la letra A el más factible para la movilidad de los vehículos y la letra F, aquel que presenta flujos forzados puesto que presenta velocidades menores a 40 km/h y, en algunos casos hasta 0km/h. En otras palabras, podría existir una saturación total del flujo de tránsito en diferentes tramos de la carretera (ver tabla 1).



NIVEL DE SERVICIO	CONDICIÓN DE FLUJO.	VELOCIDAD MÁXIMA DE CIRCULACIÓN	VOLUMEN DE SERVICIO
A	Flujo libre	100 km/h	500 vph
B	Flujo estable	80 km/h	1.200 vph
C	Flujo estable	65 km/h	2.000 vph
D	Flujo casi inestable	55 km/h	2.400 vph
E	Flujo inestable	45 km/h	2.800 vph
F	Flujo forzado.	40 km/h	Variable (0 a máx.)

Tabla 1: Niveles de servicio de una carretera.

Fuente: (MTO, 2012)

vph = vehículo por horas.

### 1.2.1 Factores Internos o Externos que afectan el nivel de servicio.

De acuerdo a las tutorías presenciales de Maldonado (2019), existen factores internos y externos que afectan el nivel de servicio. Siendo factores internos, aquellos que se relacionan a la variación de la velocidad. Por su parte, los factores externos son las características físicas de la estructura.

Dichos factores condicionan el diseño geométrico de carreteras, puesto que al generar las características geométricas viales eficientes en determinado lugar se obtienen carreteras cómodas, seguras y continuas, mismas que permiten velocidades constantes y tránsito vehicular sin embotellamientos. Estas cualidades se logran en función de una correcta planificación del diseño geométrico, teniendo como resultado una carretera sustentable desde el componente técnico y seguro.

A continuación, detallo los factores internos y externos existentes:

#### Internos.

- Variaciones de la velocidad.
- Volúmenes, la composición del tráfico.
- El porcentaje de movimientos de entrecruzamientos.



- Movimientos direccionales.

#### **Externos.**

- Características físicas de la infraestructura.
- Ancho de carriles.
- Pendientes.
- Distancias de visibilidad.

### **1.3 Clasificación de Carreteras.**

Las carreteras tienen un papel muy importante dentro del sistema integral de transporte, por lo que es necesario realizar su clasificación, en base a características comunes o alguna acción determinada.

Las clasificaciones de mayor importancia según la Norma Ecuatoriana vial (MTO, 2012) son:

- Clasificación por Capacidad (Función de TPDA)
- Clasificación por jerarquía de la red vial.
- Clasificación por condiciones Orográficas.
- Clasificación por el número de calzadas.
- Clasificación en función de la superficie de rodamiento.

Estas clasificaciones tienen presente varios criterios que determinan la jerarquía y tipo de vía, facilitando la identificación de un proyecto carretero, mismo que califica el lugar o región donde se desarrollará.



### 1.3.1 Clasificación por capacidad vial en función del Tráfico Promedio

#### Diario Anual (TPDA).

De acuerdo a Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2012), la capacidad vial se clasifica en base al volumen de tráfico que se proyecta para el periodo de diseño, con el fin de generar una normativa en las redes de carreteras (ver tabla 2). Una correcta y acertada proyección del tránsito a futuro brindará la seguridad y condiciones óptimas de circulación para los vehículos a lo largo de la vida útil de la carretera; es decir, un correcto uso del criterio permitirá generar carreteras sustentables, pues dicho criterio condiciona directamente el diseño geométrico.

CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LAS VIAS EN BASE AL TPDA <sub>d</sub>			
DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	TRÁFICO PROMEDIO DIARIO ANUAL (TPDA) AL AÑO DE HORIZONTE	
		LIMITE INFERIO	LIMITE SUPERIOR
AUTOPISTA	AP2	80000	120000
	AP1	50000	80000
AUTOVIA O CARRETERA MULTICARRIL	AV2	26000	50000
	AV1	8000	26000
CARRETERA DE 2 CARRILES	C1	1000	8000
	C2	500	1000
	C3	0	500

Tabla 2: Clasificación Funcional de las vías en base al TPDA

Fuente: (MTOPE, 2013)

#### Simbología

*C1 = Carreteras de mediana capacidad.*

*C2 = Carretera convencional básica y camino básico.*

*C3 = Camino agrícola / forestal.*

Y para poder tener un año horizonte la NEVI ha propuesto los siguientes valores:

- Proyectos de rehabilitación y mejoras .....  $n = 20$  años.

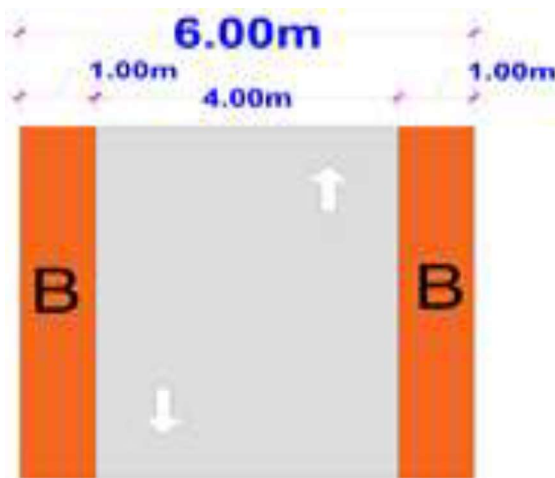


- Proyectos especiales de nuevas vías..... $n = 30$  años.
- Mega Proyecto Nacionales..... $n = 50$  años.

### 1.3.2 Clasificación según desempeño de las carreteras.

En base a MTOP (2016), El Plan Estratégico de Movilidad (PEM) de Ecuador clasificó las carreteras en base a criterios de velocidad, pendiente y sección.

- **Camino Agrícola/Forestal.**

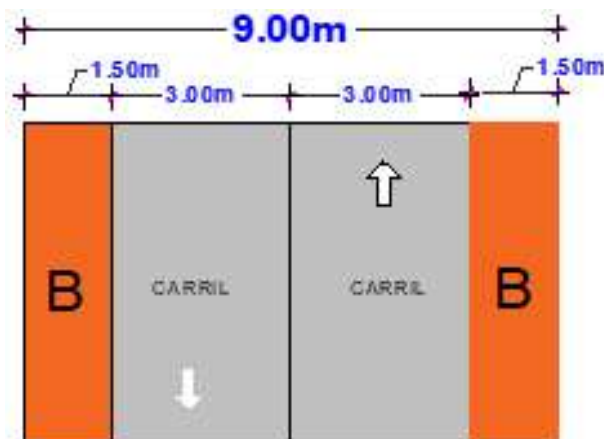


- Velocidad de proyecto: 40 km/h.
- Pendiente máxima: 16%°

Ilustración 1: Camino Agrícola/Forestal.

Fuente: (MTOP, 2012).

- **Camino Básico.**

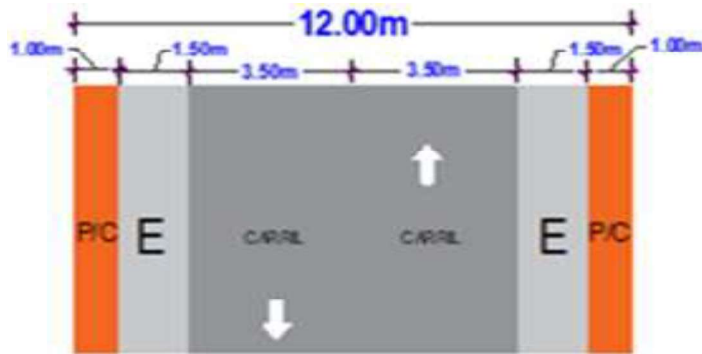


- Velocidad de proyecto: 60 km/h.
- Pendiente máxima: 14%

Ilustración 2: Camino Básico.

Fuente: (MTOP, 2012)

- Carreteras Convencionales Básicas.

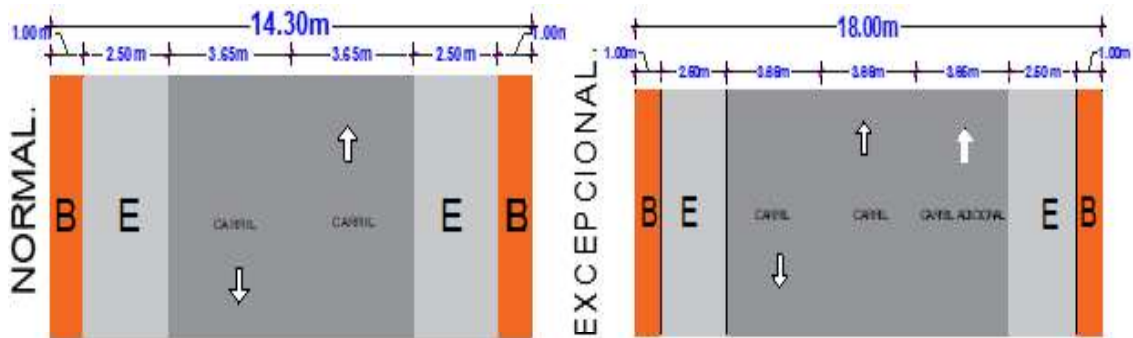


- Velocidad de proyecto: 80 km/h.
- Pendiente máxima: 10%

Ilustración 3: Carreteras Convencionales Básicas.

Fuente: (MTO, 2012)

- Carreteras de Mediana Capacidad.



Fuente: (MTO, 2012)

Ilustración 4: Carreteras de Mediana Capacidad.

- Velocidad de proyecto: 100 km/h.
- Pendiente máxima: 8 %.

- Vías de alta capacidad Interurbana.

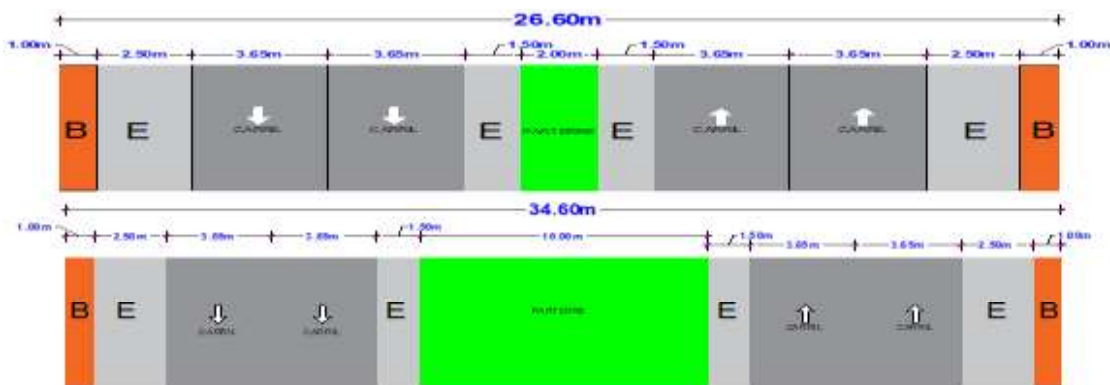


Ilustración 5: Vías de alta capacidad Interurbana.

FUENTE: (MTO, 2012)

- Velocidad de proyecto: 120 km/h.
- Pendiente máxima: 6 %

- **Vías de alta capacidad Urbana o Periurbana.**

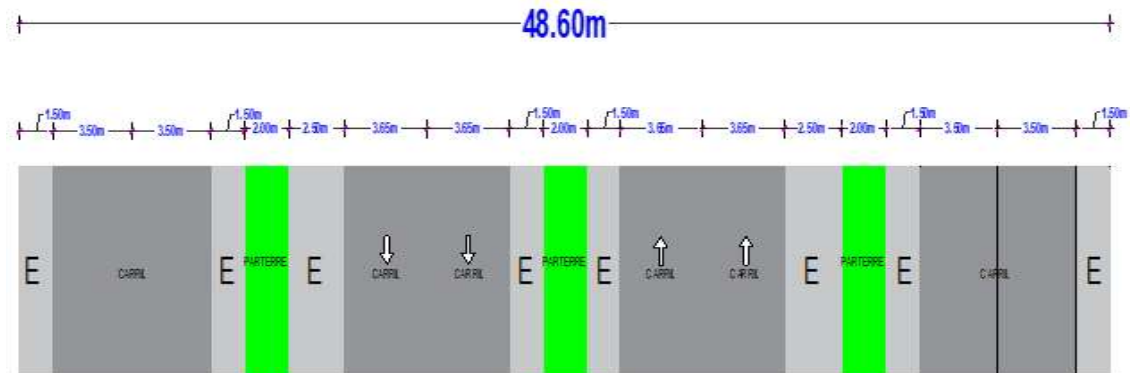


Ilustración 6: Vías de alta capacidad Urbana o Periurbana.

Fuente: (MTO, 2012)

- Velocidad de proyecto: 100 km/h.
- Pendiente máxima: 8 %

### 1.3.3 Clasificación Funcional por importancia en la red vial.

A continuación, detallo la clasificación funcional determinado por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (2012):

- **Corredores Arteriales.** - Son las carreteras de mayor importancia, son aquellas que permiten la conexión entre Capitales de Provincias, Puertos Marítimos, pasos fronterizos y son utilizadas para hacer recorrido de larga distancias, por tal motivo deben estar concebidas para brindar un recorrido eficiente y seguro.
- **Vías Colectoras.** - Son carreteras ubicadas en el nivel medio y están directamente encaminadas a la recolección de tráfico de vías de menor importancia, como puede ser vías de zona rural, en general vías de menor tráfico.



- **Caminos vecinales.** - Son carreteras que predominan en sectores rurales y están denominadas como básicas, abarcan el tráfico doméstico, zonas agrícolas y lugares turísticos.

FUNCIÓN	CLASE DE CARRETERA (1)	NOMENCLATURA	TPDA (2) (AÑO FINAL DE DISEÑO)	NÚMERO DE CARRILES
ARTERIAL PRINCIPAL	AUTOPISTA	AA	> 20.000	4 a 8
	ARTERIAL RURAL	AR	10.000 - 20.000	4 a 6
	ARTERIAL URBANA	AU	10.000 - 20.000	4 a 6
ARTERIAL MENOR	ARTERIAL MENOR RURAL	AMR	3.000 - 10.000	2
	ARTERIAL MENOR URBANA	AMU	3.000 - 10.000	2
COLECTOR MAYOR	COLECTOR MAYOR RURAL	CMR	10.000 - 20.000	4 a 6
	COLECTOR MAYOR URBANA	CMU	10.000 - 20.000	4 a 6
COLECTOR MENOR	COLECTOR MENOR RURAL	CR	500 - 3.000	2
	COLECTOR MENOR URBANA.	CU	500 - 3.000	2
LOCAL	LOCAL RURAL	LR	100 - 500	2
	LOCAL URBANA	LU	100 - 500	2
	RURAL.	R	<100	1 a 2

Tabla 3: Clasificación Funcional por importancia en la red Vial.

Fuente: (MTOPI, 2012)

### 1.3.4 Clasificación según las condiciones orográficas.

El criterio que se emplea en esta clasificación se basa en el relieve del terreno natural, y serán diferenciadas por la pendiente que tienen (ver tabla 4).

TIPO DE RELIEVE	MÁXIMA INCLINACIÓN MEDIA
LLANO	$i \leq 5$
ONDULADO	$5 < i \leq 5$
ACCIDENTADO	$15 < i \leq 5$
MUY ACCIDENTADO	$25 < i$

Tabla 4: Clasificación según las condiciones orográficas.

Fuente: (MTOPI, 2013)



### 1.3.5 Clasificación según el número de calzada

**Carreteras de calzada separadas.** - Estas carreteras se diferencian porque se le adiciona un elemento separador para cada sentido. El elemento físico tiene que ser mayor a 15cm de altura.



*Ilustración 7: Clasificación según el número de calzada.*

*Fuente: (García, 2009)*

**Carreteras de calzada única.** - Se caracterizan por tener una sola calzada para diferentes sentidos. No poseen ningún tipo de separación física y no depende del número de carriles.



*Ilustración 8. Carretera de calzada única.*

*Fuente: (García, 2009)*

### 1.3.6 Clasificación de acuerdo a la Superficie de Rodamiento.

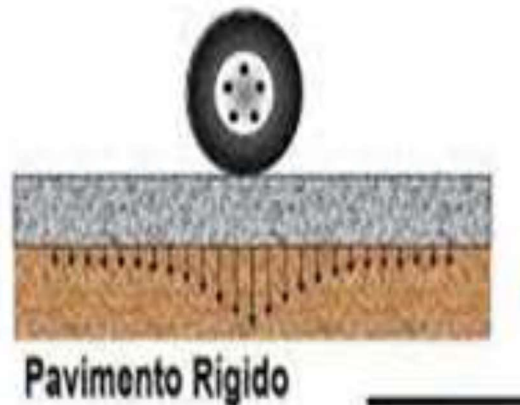
- **Pavimento Flexible.** - Su capa de rodadura está formada por una mezcla bituminosa de asfalto, logrando una estructura que se deflacta o flexiona en función de las cargas a las que estén sometidas (MTO, 2012).



*Ilustración 9: Distribución de esfuerzos en pavimentos flexible.*

*Fuente: (Giordani, 2016)*

- **Pavimento Rígido.** - Estos pavimentos consisten en una losa de concreto hidráulico (agua, cemento, arena y grava), apoyada sobre una capa de material granular colocado a lo largo de la calzada (MTO, 2012).



*Ilustración 10: Distribución de esfuerzos en pavimentos Rígidos.*

*Fuente: (Giordani, 2016)*



- **Afirmado.** - Su superficie de rodadura está compuesta por una capa de material bien graduado, en el cual su tamaño máximo es de dos pulgadas y media, correctamente compactados (MTOPI, 2012).



*Ilustración 11: Terreno afirmado.*

*Fuente: (Mescua, 2018)*

- **Superficie Natural.** - La superficie de rodadura se basa en una capa de terreno natural, correctamente conformado (MTOPI, 2012).



*Ilustración 12: Superficie Natural.*

*Fuente: (Mescua, 2018)*

Para el presente trabajo de titulación los autores optaron por focalizar la investigación de tal manera que el momento de presentar los criterios de sustentabilidad aplicado al diseño geométrico de carreteras estos sean aplicables a las vías arteriales, durante el desarrollo del capítulo 5 “ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS ACCIONES DENTRO DE LAS FASES DEL DISEÑO GEOMÉTRICO VIAL DE CARRETERAS SUSTENTABLES” se delimitará el alcance de los criterios según el desarrollo de dicho capítulo.



## **1.4 Proyecto carretero.**

Un proyecto carretero se define como la planificación vial, que tiene como objetivo ejecutar procesos que permitan el diseño y construcción de una carretera o el estudio técnico para el mejoramiento de una ya existente.

### **1.4.1 Fases del proyecto**

Este acápite está enfocado en la identificación y descripción de las fases para el diseño de un proyecto de infraestructura carretera, con la idea de mejorar la estructura vial y la calidad de vida de sus usuarios. Sin duda alguna, las redes viales son de gran importancia para el desarrollo de las ciudades y los países, ya que tienen el fin de reducir costos, tiempo de viaje y mejorar la seguridad de sus usuarios.

Las fases del proyecto carretero son indispensables para generar carreteras eficientes y sustentables, por tanto, es necesario generar criterios que mejoren el nivel del servicio del proyecto. De acuerdo a Maldonado (2019), se puede establecer tres fases que explico a continuación:

#### **1.4.1.1 FASE 1: Prefactibilidad.**

Esta etapa consiste en avaluar y analizar las posibilidades de solución al problema que se planteó al inicio del proyecto. Se evaluará las necesidades y se planteará alternativas que ayuden a cumplir con los requerimientos. Por tanto, se realizan las siguientes actividades:

- Realizarán las investigaciones necesarias para obtener las variables más relevantes del proyecto:
  - Análisis ambientales.
  - Políticas y ordenanzas públicas que regirán el proyecto.
  - Inspección del terreno donde se emplazará el proyecto.



- Tráfico Promedio Diario Anual proyectado (TPDA).
- Plantear y realizar alternativas a nivel de anteproyecto, para una o más rutas que den solución a la demanda del proyecto.
- Se generarán tablas comparativas sobre costos y beneficios de cada una de las alternativas, generando ofertas y demandas, con el fin de ir eliminando las rutas que no cumplan con los objetivos planteados al inicio del proyecto.

El objetivo de esta fase será verificar si el proyecto se desarrollara de manera confiable y de ser viable económicamente se escogerá la mejor alternativa para continuar con el diseño.

Las actividades de mayor importancia para el cumplimiento de esta fase son las siguientes:

- Estudios específicos de la zona en la cual se emplazará el proyecto.
  - Estudios cartográficos.
  - Geología de la zona.
  - Vuelo de drones.
  - Aerofotogrametrías.
- Estudios de tráfico de la zona.
- Evaluación de alternativas.
- Escoger alternativa.

Dentro del diseño geométrico de carreteras, en la fase de prefactibilidad, el equipo consultor debe realizar un análisis de todos los factores externos del proyecto para poder



generar franjas para el posible trazado del alineamiento horizontal del diseño. Además, se debe realizar un análisis de las características que condiciones directamente la sustentabilidad, entre ellas: las cartas topográficas, hidrológicas, geológicas, uso de suelo, entre otras. Puesto que la valoración de cada uno de los criterios mencionadas, permitirán la selección del trazado más óptimo, siendo considerado como sustentable y eficiente.

#### **1.4.1.2 FASE 2: Factibilidad**

Esta fase tiene como objetivo aclarar las incertidumbres con relación a la inversión del proyecto, lo que consistirá en la finalización de estudios preliminares para escoger la alternativa más idónea.

En esta fase es necesario el reconocimiento del área y la topografía por donde pasará el proyecto, con el fin de evitar zonas que puedan poner en riesgo el proyecto. Si el recorrido da como resultado una zona favorable se iniciará con la implantación de la carretera, diseño de obras de drenaje, taludes, análisis de fuentes de materiales y diseño geométrico, y el presupuesto del proyecto.

Las actividades más relevantes de esta fase son:

- Replanteo del eje y recorrido del terreno.
- Levantamiento de faja topográfica de mínimo 80m para diseños nuevos.
- Análisis geotécnico de la zona.
- Diseño e implantación definitiva del eje.
- Estudio de impacto ambiental.
- Diseño de obras de arte.
- Estudios y presupuesto aproximado.



- Diseño geométrico.

### **1.4.1.3 FASE 3: Diseños definitivos.**

En esta fase se realiza el diseño de todos los componentes de la carretera a detalle, entre ellos el diseño geométrico, con el cual se ubica estructuras de drenaje, puentes, túneles, alcantarillas etc.

Cada uno de los diseños serán ejecutados por un profesional de la rama, conformando así un equipo multidisciplinario, con el fin de tener análisis en los diversos campos que contempla el estudio de un proyecto carretero.

Ramas requerentes para el diseño de una carretera:

- Hidráulico – Hidrológico.
- Diseño geométrico.
- Geológico – Geotécnico.
- Pavimentos.
- Estructuras.
- Impactos ambientales.
- Tráfico.
- Señalización.
- Presupuesto.



## 2 CAPITULO SEGUNDO. SUSTENTABILIDAD EN CARRETERAS

### 2.1 El Origen de la Sustentabilidad

En la actualidad un tema de preocupación es sin lugar a dudas el deterioro del medio ambiente y las consecuencias que esto implica. La humanidad se encuentra en un estado de vulnerabilidad, ya que con la explotación de los recursos naturales está superando la capacidad del planeta Tierra, pues se está comprometiendo la disponibilidad de recursos de las futuras generaciones. De lo expuesto nace el concepto de Sustentabilidad, mismo que busca mantener un equilibrio entre las actividades humanas y la capacidad del planeta tierra (Mendoza, 2014).

Rojas (2003), menciona que “Nuestra civilización está en proceso de colisión con el mundo natural, tal como nos dice el Aviso a la Humanidad de la Comunidad Científica realizado en 1992 por más de 1,500 científicos, entre ellos 103 “Premios Nobel”.

Esta declaración debe ser analizada y tomada en cuenta, ya que quienes lo afirman son personas con experticia en el tema. Además de declarar que se está comprometiendo el buen vivir de generaciones futuras. Dicha situación de riesgo no es algo que se produjo ahora y tampoco algo que pueda resolverse de manera inmediata, ya que está intrínsecamente relacionado con el crecimiento exponencial de la población humana, su tecnología y la demanda de recursos que solicita la misma (Mendoza, 2014).

Existen momentos en la historia que definieron un cambio exponencial en el desarrollo humano que dieron origen a la explotación indiscriminada de recursos naturales. Por ejemplo, la Revolución Industrial en Inglaterra (1760-1840) inició el uso de combustibles fósiles como fuente de energía, lo que determinó un desarrollo tecnológico acelerado y consecuentemente el deterioro del medio ambiente, provocado por el ser humano con efectos ambientales negativos e irreversibles (Mendoza, 2014). El planeta ha sufrido una



afección y alteración constante en el patrimonio natural y en el medio ambiente por más de 250 años en consecuencia de las actividades productivas del hombre.

El autor Rojas (2003), en su libro “EL DESARROLLO SUSTENTABLE: NUEVO PARADIGMA PARA LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA”, evidencia que producto del cambio climático provocado por la humanidad y la generación desmedida de CO<sub>2</sub>, dio origen a la destrucción de la capa de ozono, la disminución y extinción de especies de flora y fauna, la contaminación del aire, agua y suelo, así como otros factores que provocan una situación de peligro para el desarrollo de la humanidad.

Dichos factores de peligro se establecieron en los años 50s, como consecuencia de las actividades bélicas realizadas durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), alertando a las principales organizaciones mundiales y a los distintos gobiernos de países del mundo.

De acuerdo con (Bermejo, 2015), el Consistorio Científico Internacional realizado en 1992, considera a la revolución industrial como un evento de análisis mundial, siendo el detonante de los problemas ambientales que fatigan actualmente al planeta y que representa una problemática que debería estar en todas las agendas de los gobiernos del mundo, así como ha estado presente en las diferentes cumbres llevadas a cabo por los principales organismos mundiales, entre ellos: la Organización de las Naciones Unidas ONU, la Organización Mundial de la Salud OMS, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, etc.

Si bien es cierto, el detonante de la situación ambiental actual fue la Revolución Industrial, también es verdad que en consecuencia de la misma se impulsó el desarrollo económico, tecnológico y productivo; sin embargo, la humanidad en su afán de competir por ser más productiva, no se percató, no pensó en el impacto que sus actividades podrían



generar a su entorno. Entonces el problema no es el uso de los recursos naturales sino la sobreexplotación de los mismos sin respetar y analizar la capacidad de carga que tienen éstos (Mendoza, 2014).

La preocupación mundial por cuidar el ambiente ha sido continua y diversa desde la aparición de los organismos mundiales en los últimos 50 años. Es por ello, que se han convocado distintas conferencias a todos los países del mundo para tratar temas relacionados a los impactos y al desarrollo sustentable. A partir de ello, se ha generado una serie de acuerdos, que hoy en día sirven de guía para la elaboración de planeamientos mundiales que involucra todos los sectores productivos (Moreno Álvarez, 2018).

### **2.1.1 La Agenda del 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible**

En Septiembre de 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó un informe denominado “Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” (Moreno Álvarez, 2018).

Dicho documento de carácter estratégico fue aprobado por 193 estados pertenecientes a la Organización de Naciones Unidas (ONU), entre ellos Ecuador y otros países latinoamericanos. El tiempo de retorno de dicha agenda es de 15 años, en donde se plantearon 169 metas de desarrollo y 17 objetivos, que tienen como finalidad que el mundo alcance la sustentabilidad en sus diversos componentes económica, social y ambiental (CEPAL, 2016).

A continuación se detalla los eventos y acuerdos principales referentes a sustentabilidad para llegar a la Agenda 2030.



• AÑO	• EVENTO	• ACUERDOS PRINCIPALES
1972	Conferencia de Estocolmo	Fue la primera Conferencia de la Organización de las Naciones Unidas, en la que se abordaron temas ambientales. Los gobiernos reconocen que los recursos no renovables de la tierra, pueden agotarse por lo que se deben utilizar de forma racional para que toda la población mundial pueda gozar de estos beneficios.
1983	Se constituyó la Comisión de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Desarrollo	Esta comisión elaboró una agenda global para investigar sobre el cambio climático. Esta comisión elaboró el informe “Our Common Future” que presentó a la Asamblea de la ONU en el año 2007.
1987	Presentación del informe “Our Common Future”, ante la Asamblea General de la ONU	En este documento, también conocido como Informe Brundtland, se define por vez primera, el concepto de desarrollo sustentable. Reconoce que gran parte de la población mundial, no tiene cubiertas sus necesidades de comida, ropa, vivienda y trabajo, además de que la sociedad universal, está destruyendo el medio ambiente y dejando al grueso de la población en situación de vulnerabilidad.
1992	Cumbre Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo o Declaración de Río	En esta cumbre los gobiernos firman la Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, también conocida como Agenda 21. Se reconoce que la protección del medio ambiente en el mundo, debe formar parte integral del proceso de desarrollo de la humanidad, por lo que la humanidad en su conjunto, encabezada por los gobiernos, deben emprender acciones para protegerlo.
1997	Protocolo de Kioto	Compromete a 37 países industrializados a estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero, debido a que reconoce que son los principales responsables de los elevados niveles de estos gases que hay en la atmósfera.
2002	Cumbre de Johannesburgo	Los países participantes a la Cumbre, se comprometen de impulsar en sus territorios, el desarrollo sustentable, erradicar la pobreza e impulsar el desarrollo humano. Biodiversidad es una fortaleza que se debe aprovechar para impulsar el desarrollo sostenible.

Tabla 5 Principales Acontecimientos sobre Sustentabilidad a lo largo de la historia.

Fuente: (Alvarez, 2018) (ONU.CEPAL., 2016)



Dichos acuerdos no solo necesitan la participación de los gobiernos para que exista una implementación adecuada de la Agenda 2030. A su vez, se deben incluir de manera continua y permanente a toda la comunidad internacional, los distintos organismos de la sociedad civil, todas las unidades académicas y a las empresas privadas (Foucault, 1979; Moreno Álvarez, 2018).

Los objetivos que busca cumplir la Agenda 2030 se enfocan a distintos campos para cambiar la situación actual de la humanidad, entre los mismos destacan: Poner fin al hambre, garantizar una vida sana, educación para todos, inclusiva y de calidad, lograr ciudades y comunidades sostenibles, realizar acciones por el cambio climático, cuidar los ecosistemas, entre otros.

Dichos objetivos mencionados tienen como enfoque general promover el crecimiento económico, la inclusión social y la optimización de los recursos naturales para el cuidado del ambiente, mismos que son reconocidos a nivel mundial como tres elementos fundamentales del desarrollo sustentable (CEPAL, 2016).

Para el presente trabajo de titulación existe un objetivo que se relaciona directamente con la problemática a tratar. El objetivo 9 de la Agenda 2030 que indica “Industria, Innovación e Infraestructura”, mismo que resalta: “Construir Infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación”.

Aplicando el concepto de resiliencia al diseño geométrico de carreteras se puede contextualizar que un diseño geométrico resiliente es aquel que contempla de manera adecuada el desarrollo del tráfico futuro, de manera que mientras no se cumpla el periodo de diseño de la carretera debe soportar la variación del tráfico sin comprometer los tiempos y velocidades definidos al momento de diseñar la carretera.



El objetivo ya mencionado establece que para fomentar el desarrollo sustentable de su población, los los países deben invertir y promover la modernización de las carreteras, infraestructura de transporte de una manera sustentable y de alta calidad (CEPAL, 2016; Moreno Álvarez, 2018).

## **2.2 Desarrollo Sustentable**

El desarrollo sustentable es un tema en auge en los tiempos modernos, dónde se hace referencia al crecimiento y desarrollo tecnológico productivo y social en todos los países, debe ir directamente relacionado con políticas de protección al medio ambiente al desarrollo social y al desarrollo económico, buscando de esta manera poner equilibrio entre el desarrollo y la sustentabilidad a largo plazo (Mendoza, 2014).

Muchas veces se tiende a definir al desarrollo sustentable como un proceso, un algoritmo. Una de las limitantes de mayor importancia en el proceso ya mencionado es la explotación de recursos naturales que son finitos. Es necesario cambiar de una manera significativa los algoritmos de producción y consumo, especialmente en los países del primer mundo, ya que los mismos tienen la mayor huella ecológica, es decir en dichos países se ocupa una mayor área para producir y almacenar los desechos por individuo. Un camino para lograr minimizar dichos impactos es el uso de tecnologías eco amigables, que generen un menor impacto ambiental y necesiten de un menor consumo de energía fósil (Mendoza, 2014).

Entonces, se puede definir al desarrollo sustentable como el equilibrio integrado de los pilares económicos, sociales, ambientales, técnicos y de seguridad. En dónde la generación y producción de bienes respetan la integridad de los componentes previamente mencionados, al igual que la prestación de servicios, siendo esta la manera que controla

la vulnerabilidad y capacidad de carga que tiene el medio ambiente (Moreno Álvarez, 2018).

En el año 2012, la asamblea de la ONU tuvo una conferencia en la que se trató el desarrollo sustentable en Río de Janeiro, en la ya mencionada reunión se generó un informe “El futuro que Queremos” mismo que expresa la noción del desarrollo sustentable haciendo referencia a 3 pilares fundamentales: social, económico y ambiental. No obstante, gracias a los actuales trabajos de investigación se sabe que además se debe incluir el pilar técnico y la seguridad (Mendoza, 2014).

A continuación, en la ilustración 13 se esquematiza los componentes de la sustentabilidad y a su vez se evidencia la necesidad de un equilibrio entre los componentes, para de esta manera obtener una carretera sustentable.



*Ilustración 13. Criterios de Sustentabilidad para Carreteras.*

*Fuente: (Sanchez, 2014)*

Además, el informe de la ONU resalta que para lograr un desarrollo sustentable es necesario promover un crecimiento sostenido equitativo e inclusivo, generando oportunidades para todos, minimizando las desigualdades sociales, mejorando los niveles de vida a través de la implementación de los servicios básicos, fomentando la



conservación del medio ambiente. De esta manera, se contribuirá desarrollo económico y social, así como la conservación de los ecosistemas.

Desarrollo sustentable es una expresión polisémica debido a la diversidad de definiciones expresadas por varios autores desde las diversas disciplinas y perspectivas. No obstante, el presente trabajo tiene como finalidad el reto de integrar las características óptimas a los procesos del diseño geométrico de Carreteras.

### **2.3 Carreteras Sustentables (Introducción al concepto, ejemplificación con carreteras ERF, Carreteras Verdes, y FHWA)**

El término de sustentabilidad dentro del contexto de carreteras principalmente hace referencia al cuidado ambiental; sin embargo, debe considerarse cualquier componente que pueda ser sustentable en las vías de comunicación, también se debe garantizar el cuidado del medio ambiente, así como la seguridad y la calidad de los desplazamientos, la rentabilidad económica y social; de esta manera se contribuye al desarrollo de los países (Mendoza, 2014).

Internacionalmente se han hecho investigaciones y trabajos referentes a la movilidad y transporte sustentable; pero, existen pocos estudios que se orientan exclusivamente al aspecto de infraestructura y diseño geométrico de carreteras, por lo que se debe abordar de una manera más exhaustiva estos aspectos de sustentabilidad.

European Union Road Federation (2009), define a las carreteras sustentables como *“aquellas carreteras que son eficaces y eficientemente planeadas, diseñadas, construidas, modernizadas y conservadas, a través de políticas integradas con respecto al medio ambiente y conservan el beneficio socio-económico esperado en términos de movilidad y seguridad”*.



La Universidad de Washington elaboró un método llamado “Carreteras Verdes” (Greenroads). Básicamente se usa para diferenciar las carreteras sustentables por medio de una certificación. Dentro de este argumento una carretera sustentable tiene impactos al medio ambiente menores a las carreteras tradicionales. El costo de su periodo de vida útil es inferior y brinda más beneficios para el desarrollo de la sociedad (Moreno Álvarez, 2018).

La Agencia Federal de Carreteras (FHWA, por sus siglas ingles) define a las carreteras sustentables como “parte integral del desarrollo sustentable”. Las características de un proyecto sustentable vial deben ser analizadas en todo su periodo de vida útil, desde el diseño hasta la construcción, operación y mantenimiento. Este concepto se enfoca en que las carreteras son parte de la infraestructura para el transporte y este a su vez es uno de los componentes fundamentales de las necesidades humanas (Moreno Álvarez, 2018).

### **2.3.1 Carreteras sustentables (ERF)**

En el año 2009, la Federación de Carreteras de la Unión Europea elaboró un documento el cual indica cómo desarrollar una carretera sustentable.

A continuación, se describe las etapas del proyecto de mejores prácticas de sustentabilidad de la ERF, ya que en la sustentabilidad de carreteras debe contener aspectos ambientales, sociales y económicos.

#### **2.3.1.1 Diseño y planeación de carreteras**

En la primera etapa del proyecto, según European Union Road Federation (2009), es muy importante incorporar en la ejecución de proyectos carreteros, la Evaluación de Impactos Ambientales (EIA) que provocan en el desarrollo proyecto. Por otra parte, la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) cumple con un rol muy importante como criterio en la valoración ambiental de planes y programas. Además, el diseño del alineamiento vertical



de la carretera debe ser concebido de manera que pueda disminuir el excesivo consumo de energía en la construcción, operación y mantenimiento de las carreteras y reducir los niveles de emisiones que afectan negativamente a la atmósfera.

Existen medidas para minimizar los impactos ambientales negativos en las áreas naturales que cuentan con un alto valor ambiental, mismas que demandan un particular cuidado y son: pasos de fauna, barreras anti ruido, un adecuado diseño geométrico, uso de especies vegetales locales, etc. (European Union Road Federation, 2009; Mendoza, 2014).

### **2.3.1.2 Construcción, operación y conservación de las carreteras**

Para la ejecución de estas fases es de suma importancia contar con el diseño geométrico de la carretera. Estos diseños deberán contar con un sin número de criterios que permitan generar un proyecto carretero sustentable durante todas sus etapas y lo largo de su periodo de vida útil, de modo que permita mejorar la calidad de vida de las personas.

Los criterios a considerar tienen, en cierta medida, la función de mitigar o eliminar cada una de las problemáticas existentes de determinado territorio a largo, mediano y corto plazo. Además, considera lineamientos que mitiguen las posibles consecuencias negativas por la implantación del proyecto carretero.

En este sentido, existen varios casos de estudio o referencias de actividades que han generado impactos positivos dentro de la construcción, operación y conservación de las carreteras. Así también diversas entidades se han encargado de generar recomendaciones alternativas que permitan lograr los objetivos del desarrollo sostenible.

Hay varios críticos manifestando que para mejorar la eficiencia de la etapa constructiva de carreteras sustentables es importante considerar el manejo adecuado de los recursos renovables y no renovables a través de la disminución de la sobreexplotación de los



recursos renovables, el uso óptimo de la energía, así como la reducción de los impactos ambientales. Aspectos que conllevarían a una disminución de costos del proyecto.

Por su parte, solicitar la implementación de mejores prácticas para la construcción y el mantenimiento de las carreteras también permite conseguir mejoras sustanciales en el territorio, a través de: el control de los residuos sólidos, la reducción del consumo de materiales y de energía (mediante la reutilización de materiales reciclados y la utilización de maquinarias en buenas condiciones), disminución de las emisiones de gases contaminantes generadas y los accidentes en los vehículos que transportan materiales. (European Union Road Federation, 2009; Moreno Álvarez, 2018).

De acuerdo (ERF, 2009), dentro de las etapas de construcción y mantenimiento de las carreteras se debe evitar la contaminación del agua o reducir potencialmente dicho impacto. Para ello, se debe realizar un análisis de las actividades que se desarrollarán durante las etapas previamente mencionadas, de manera que se logre mitigar o anular la contaminación de los escurrimientos subterráneos y los superficiales.

Actualmente, es frecuente la optimización del uso de la infraestructura del transporte existente para reducir el volumen de capas granulares nuevas. Para ello es indispensable utilizar herramientas incluidas en los Sistemas Inteligentes para el Transporte (ITS, por sus siglas en inglés) tales como: I-Transport, TrafficScan, TransitLink, entre otros.

Desde hace algún tiempo, países pertenecientes a la ERF (European Unión Road Federation); tales como: Francia, España, Suiza, India, Italia, etc. Han optado por colocar junto a las carreteras sumideros para coger carbono y óxidos de nitrógeno, esto hace referencia no sólo a poseer árboles que absorban CO<sub>2</sub>, sino a otros recursos de la infraestructura, entre ellos: los pavimentos de concreto adicionados con otros compuestos químicos para la captura y supresión de esta clase de contaminantes.



Ilustración 14: Sumideros de Carbono.

Fuente: <https://www.sostenibilidad.com/cambio-climatico/sumideros-carbono-que-son/>

Otro criterio importante a considerar es el ruido. Si bien, el ruido puede ser generado por diversos factores, uno de ellos es el tránsito vehicular, mismo que se presenta principalmente en los sectores que cuentan con vías de mayor afluencia vehicular y afectando a las personas residentes; por lo que, mitigar este aspecto para defender la salud de las personas es primordial; para ello es necesario la implementación de procedimientos para controlar el ruido o en su defecto la utilización de medidas de mitigación tales como, las barreras anti sonido o pavimentos silenciosos.

Uno de los elementos más afectados con la implementación de carreteras son los animales que habitan en aquel lugar, puesto que ellos no reconocen que se ha intervenido en el sitio por el cual han circulado toda su vida. Cada año, una cantidad significativa de animales son arrollados en las carreteras ocasionando su muerte. En la actualidad hay una extensa gama de medidas para evitar la morbilidad de la fauna, como por ejemplo la instalación de cercas, dispositivos como detectores y alarmas para defender a las especies, los cuales tienen que considerarse en el diseño de carreteras.

### 2.3.1.3 Financiamiento de la sustentabilidad

Se refiere al análisis del costo del periodo de vida útil del proyecto en donde los componentes técnicos y económicos estén debidamente equilibrados. Este es un criterio



fundamental en la sustentabilidad, de tal forma que al tener mejores carreteras se genere un aumento de la seguridad y a su vez reducción de los impactos del medio ambiente, mejorando los índices de acciones sustentables.

Busca disponer de infraestructura para el transporte con los más grandes estándares de calidad, encaminada a saciar la movilidad enfrentando los desafíos recientes de cuidado al medio ambiente y de la estabilidad carretera.

### **2.3.2 Carreteras verdes (Greenroads)**

Carreteras verdes, es un nuevo término desarrollado por investigadores del Estado de Washington en el 2007 para diferenciar la sustentabilidad en las carreteras nuevas, rediseñadas o rehabilitadas (Greenroads, 2011). Una diferencia notoria de esta clase de tendencia es que ayuda a que las carreteras tengan menores impactos al medio ambiente y al precio del periodo de vida útil de la carretera, así como más grandes beneficios para la sociedad. Para desarrollar el presente subcapítulo se realizó una revisión bibliográfica de Mendoza (2014) para posteriormente determinar los procesos aplicables al diseño geométrico de carreteras.

Carreteras verdes en términos globales son: un grupo de buenas prácticas que son aplicadas a las carreteras para su diseño y construcción, mismas que se dividen en dos tipos: las de cumplimiento legal y las de cumplimiento voluntario.

La sustentabilidad usada en Greenroads tiene siete componentes diferentes que se presentan; dichos elementos son la base de los términos "leyes naturales" y "valores humanos". Integran los tres principios habitualmente citados en la sustentabilidad: ecología, sociedad y economía, además hay otros cuatro componentes fundamentales que se enfatizan en el entorno de las medidas de Greenroads: extensión, expectativa, vivencia



y exposición. A continuación, se explican brevemente los elementos que incorporan la sustentabilidad en Greenroads:

- Requerimientos del proyecto
- Medio ambiente y agua
- Acceso y equidad
- Materiales y recursos
- Tecnología en pavimentos

### **2.3.2.1 Requerimientos del proyecto**

Según Greenroads (2011), la evaluación de impacto ambiental es un procedimiento que se basa en la toma de decisiones sobre el cual la autoridad ambiental delega la creación de un nuevo proyecto carretero por medio de la intervención de los diferentes componentes.

El estudio del precio del periodo de vida útil es un instrumento que posibilita valorar el precio total de un pavimento, incluyendo el precio inicial de diseño y construcción, los precios de mantenimiento y rehabilitación y los precios de los usuarios a lo largo del periodo útil de la carretera. La implementación de este instrumento auxilia a la sustentabilidad de las carreteras ya que posibilita una toma de elecciones sobre el precio total del proyecto carretero a lo largo de su construcción y operación.

El inventario de periodo de vida útil es un instrumento que posibilita examinar y cuantificar los impactos del medio ambiente en el proceso de creación y mantenimiento de una carretera. Su estudio se hace mediante un programa especializado en el cual se modelan los periodos de vida de un producto (materia prima, producción, uso, fin de su historia, procedimiento, reciclado y disposición final) para la obtención de los consumos



de energía y emisiones de gases a la atmósfera. La aplicación de este instrumento posibilita elegir métodos o grupos que minimizan el impacto ambiental.

El proyecto de control de calidad, es una herramienta que posibilita mantener el control y mejorar la calidad de cualquier proceso constructivo de una carretera, llevando a cabo registros que establecen en qué momento se tienen que tomar ocupaciones correctivas y cómo se van realizar. Su preparación se concibe basado en las especificaciones técnicas vigentes; por ejemplo, control de calidad de los materiales, procedimientos de trabajo, entre otros. Los métodos que incorporan el proyecto de control de calidad se conciben previamente que inicie la construcción.

Disponer de una estrategia de reducción de ruido, posibilita acciones para minimizar el efecto sonoro que se produce en las diversas etapas en la ejecución de un proyecto carretero, por medio del monitoreo de los niveles de sonido que se generan por la operación de los conjuntos motorizados y las ocupaciones de construcción. Este monitoreo se debería amplificar en la fase de operación y mantenimiento de la carretera, para controlar los desniveles permitidos para la salud humana y la diversidad biológica.

El proyecto de manejo de residuos es una medida para prevenir la contaminación en la fase de construcción de carreteras, causado primordialmente por la demolición y movimientos de tierra, así como por el personal de la obra y los residuos de la maquinaria. Su planeación se compone en la contabilidad y administración de los materiales que posibilita la identificación, unidad de medida y procedimiento para su almacenamiento y desempeño (como material perjudicial o residuo), accediendo el proceso de reciclaje y reutilización. Esto disminuye precios y fomenta las buenas prácticas para la reducción y/o supresión de los residuos sin afectación a la zona.



Para disminuir la contaminación del agua y las consecuencias involucradas a las acciones de construcción, existe el plan de prevención de contaminación, el cual es una herramienta que al ser aplicada nos permite proteger la calidad de la escorrentía de aguas pluviales, esta herramienta básicamente funciona con base en la topografía, de esta manera se detectan áreas de almacenamientos de residuos y distintos materiales existentes, los mismos que son los principales contaminantes del agua superficial. Existen algunas soluciones tales como: trampas para residuos, sistemas de infiltración, siembra de árboles temporales y permanentes, control de derrame de maquinarias, etc.

En el desarrollo de evaluación de las condiciones del pavimento y sus procesos a ser realizados en el ámbito de mantenimiento y rehabilitación, se lo realiza mediante la gestión de pavimentos, la misma que es un instrumento que se basa en los criterios para la toma de decisiones. De esta manera se elige la mejor opción, la cual permite diseñar pavimentos que tengan un periodo de vida más largo, mejor funcionalidad, disminuir costos de vida útil y la reducción de la explotación los recursos naturales.

Las actividades de mantenimiento se lo realizan mediante el plan de mantenimiento del sitio, de esta manera existe un monitoreo y control de las actividades durante el proceso operacional, este plan nos permite mantener la calidad ambiental y el paisaje de la carretera, de esta manera se logra ahorrar eficientemente los costos durante la vida útil de la carretera.

Por último; el aspecto social, el cual se maneja mediante la herramienta de la capacitación ambiental que permite promover, por un lado, la conciencia de los usuarios y, por otro lado, a los operadores, cómo realizar los servicios y actividades de una carretera. De esta manera se pretende crear buenos hábitos que fomentan la sustentabilidad ambiental y sobre todo la seguridad.



### 2.3.2.2 Medio ambiente y agua

El correcto manejo del agua durante las fases de diseño y construcción es de vital importancia para desarrollar proyectos de carreteras sustentables, ya que afectar la calidad del agua representa un impacto negativo al medio ambiente. Los escurrimientos de agua deben ser protegidos, encausados y de ser posible evitar alterar su flujo natural, aún más importante se debe impedir causar algún tipo de alteración de la calidad del agua.

Se debe de evaluar e identifica la existencia de contaminantes en el agua, como, por ejemplo: los metales pesados, hidrocarburos y agentes patógenos, éstos dependen de la estructura del tránsito y el medio ambiente, por lo que se debe intervenir hasta que sean eliminados en su totalidad mediante procesos que se rijan a las normas de calidad del agua y que de una manera directa favorezcan a las aguas superficiales y así promover un medio ambiente sustentable.

Es muy importante tomar en cuenta la vegetación nativa puesto que esta es una especie que se desarrolla en una región determinada, su presencia es el resultado de circunstancias naturales, es decir sin intervención humana y formaría parte del sistema de vegetación sustentable, misma que aporta a la reducción del uso de agua, disminuye los costos de mantenimiento debido a que está adaptada al entorno local y tiene una mejor capacidad de supervivencia, ayuda a disminuir y controlar la erosión del suelo, aporta significativamente a la calidad del aire y agua, evita la expansión de plagas, entre otros aspectos que aportan positivamente al desarrollo sustentable.

Existe una lista de actividades, las cuales están integradas dentro de la conectividad ecológica que tiene el fin de reponer el paisaje quebrantado, sin interrumpir la movilidad: proporcionar caminos para la flora y fauna nativa, de esta manera se logra un equilibrio



ecológico ya que tienen una interacción independiente con la carretera que ayudan a disminuir los impactos negativos.

Existe otra causa que provoca la degradación del medio ambiente que interviene negativamente en la diversidad de especies de flora y fauna; esta es la contaminación lumínica, que provoca daño por la radiación de luz de artificial. Por ello, la iluminación en carreteras al ser un requisito indispensable en la fase de planificación de una carretera, debe buscar alternativas sustentables para disminuir los impactos negativos que ésta provoca; una de estas alternativas, es el uso de sellos mismos que protegen y restituyen el medio ambiente por la noche y aporta a la construcción de una carretera sustentable.

### **2.3.2.3 Acceso y equidad**

Para garantizar la seguridad vial en la carretera se debe realizar auditorías, cuya supervisión la lleva a cabo técnicos y especialistas independientes y autónomos al personal que labora en la obra, de esta manera se podrá identificar los puntos de conflicto para disminuir los accidentes viales y sus impactos negativos. Dentro del contexto de acceso y equidad es primordial el diseño sensible, este es una herramienta que ayuda a establecer alternativas para una correcta elección de decisiones para un diseño inteligente, con el fin de conservar y aumentar los recursos estéticos, históricos y del medio ambiente. Este diseño ofrece implementar infraestructura para bicicletas, peatones y sistemas de tránsito, que garantizan la seguridad y movilidad en carreteras dentro del casco urbano.

Mediante el uso de software se puede crear un modelo de tránsito vehicular y a partir de este elaborar estrategias que garanticen un transporte sustentable y activo. La huella de carbono en una carretera se obtiene a partir de la disminución de emisiones vehiculares, al disminuir las emisiones provocadas en carreteras se aumenta la calidad del aire y la



salud de la vida humana; también, permite definir políticas para la disminución de emisión de gases de efecto invernadero a nivel regional.

Se debe implementar el diseño de una ciclovía dentro del diseño geométrico de una carretera, para que los ciclistas puedan circular en el derecho de vía dentro de una carretera, de esta manera se disminuye las incidentes con automóviles, también, se promueve el uso de bicicletas con el fin de tener un medio de transporte activo para mejorar la calidad de vida humana; con la implementación de una ciclovía se disminuye el congestionamiento de los vehículos ya que existe un desplazamiento regulado entre usuarios y peatones.

Es importante tener en cuenta la conservación de los sitios históricos, se debe incluir monumentos, obras de arte, estatuas con significado histórico y cultural, de esta manera se fomenta el arte y brinda una mejor apariencia a los diseños de carreteras, se impulsa a realizar visitas turísticas a lugares considerados patrimonio nacional de una ciudad.

#### **2.3.2.4 Materiales y recursos**

Una de las actividades para reducir el impacto ambiental negativo dentro del contexto de materiales y recursos es el reciclado de pavimentos, esta actividad se lo realiza mientras se da el mantenimiento de la superficie de la vía, de esta manera se recupera el material que conforma la superficie de rodadura del pavimento; así, se disminuye costos del periodo de vida útil de la carretera y se promueve el desarrollo sustentable.

Para aminorar los viajes de acarreo se propone realizar un equilibrio de movimiento de tierras; esta estrategia se basa en el hecho que el volumen de corte sea igual al volumen de relleno para que el material de corte sea usado para rellenar otro espacio; si existe el caso en el que el material de corte no cumpla con las especificaciones técnicas requeridas,



se recomienda mejorar este suelo con algún aditivo como puede ser: cal, cemento, entre otras alternativas de estabilización.

Un componente elemental es el uso de materiales locales ya que nos beneficiará en la reducción de costos dentro del transporte de material, el número de viajes estimados y la cantidad de maquinaria necesitada, de esta manera se evitará el impacto ambiental negativo con la reducción de emisiones involucradas con el transporte. En caso que este material no cumpla con especificaciones técnicas requeridas sería indispensable el mejoramiento de los mismos.

#### **2.3.2.5 Tecnología en pavimentos**

Dentro de tecnología en pavimentos para reducir el impacto ambiental negativo y promover el diseño de una carretera sustentable existen varias actividades que se deben realizar, que se detalla a continuación.

El diseño estructural y uso del pavimento permeable; este contribuye a la disminución de la erosión, reducción de la contaminación de aguas subterráneas, ayuda a la conservación y calidad de aguas pluviales; sin embargo, el uso de este no es adecuado para altos volúmenes de tránsito; pero, es muy común la aplicación del pavimento permeable a vías que están destinadas para uso de ciclistas y peatones.

Una acción sustentable, es el uso de mezclas asfálticas tibias en lugar de mezclas asfálticas en caliente, ya que estas causan muchos impactos negativos en el ambiente, tales como: grandes emisiones contaminantes, lluvia ácida, creación de smog. Todas éstas provocan el calentamiento global. Mientras que las mezclas asfálticas tibias promueven a disminuir el uso de combustibles fósiles, conservar el medio ambiente, mejorar la salud humana y mejoran los costos a la hora de dar mantenimiento.



Otra de las actividades sustentables, es la implementación de pavimento en frío, ya que, con ésta se da a lugar la disminución de la reflexión solar, puesto que se usa materiales de color claro y con ello mejora la temperatura con la colocación de materiales de construcción porosos que consienten el enfriamiento al fluir el aire y agua en la capa estructural de la vía.

Por otro lado, existe el pavimento silencioso. Básicamente, disminuye el ruido producido por el contacto entre los neumáticos de los vehículos y el pavimento, mediante herramientas que controlan y analizan su textura, de esta manera ofrecen beneficios como la reducción de la contaminación acústica en el medio ambiente y mejoran la salud, también existen otras alternativas como por ejemplo la implementación de muros aislantes o barreras anti ruido (Greenroads, 2011).

### **2.3.3 Carreteras sustentables (FHWA)**

La Agencia Federal de Carreteras (FHWA, por sus siglas ingles) las define como “parte integral del desarrollo sustentable”. Las características de un proyecto sustentable vial deben ser analizadas en todo su periodo de vida útil, desde el diseño hasta la construcción, operación y mantenimiento. Este concepto debe entender que las carreteras son parte de la infraestructura para el transporte y este a su vez es uno de los componentes fundamentales de las necesidades humanas. Además de incluir las necesidades naturales y ambientales, se debe incluir las necesidades humanas como es el caso de desplazamientos de personas y mercancías y asegurar que todas las rutas de transporte sean confortables y seguras para peatones, ciclistas y el tránsito (Mendoza, 2014).

La base para que un proyecto carretero sea sustentable es el análisis y seguimiento del proyecto, cumpliendo con todos los requisitos planteados en su concepción y diseño por parte del personal involucrado. Para la FHWA es primordial la seguridad dentro de la



sustentabilidad, ya que de esta manera se cumple socialmente con los componentes de la sustentabilidad (Mendoza, 2014).

#### **2.4 Componentes de la Sustentabilidad en las Carreteras (Componente económico, social, técnico, ambiental, seguridad)**

La sustentabilidad de carreteras se define en función de los componentes de la misma; de acuerdo a lo revisado en el anterior capítulo existen diferentes modelos de carretera sustentables; si bien las mismas comparten similitudes, los componentes pueden ser muy dispersos en función de si son definidos por la Federación de carreteras de Unión Europea, o por Greenroads, entre otros. Entonces se podría decir que los proyectos de carreteras que se denominan como sustentables, cumplen con algunos de los elementos previamente descritos, pero nunca van a llegar a alcanzar el nivel absoluto es ahí donde se debe aplicar criterios para poder calificar el nivel de sustentabilidad que puede llegar a tener una cartera (Mendoza, 2014).

El autor Mendoza en su publicación “Criterios de sustentabilidad de carreteras En México”, define cinco componentes con los que se califican la investigación. En el presente trabajo se describirá de manera general los componentes que evalúan la sustentabilidad de carreteras para posteriormente filtrar la información y ver qué puede ser aplicable al diseño geométrico de Carreteras (Mendoza, 2014).

Además, se mencionará criterios de sustentabilidad que están dentro de los componentes de las carreteras, y que a su vez dichos criterios pueden repetirse en más de un componente, dada su connotación interdisciplinaria, es decir, un criterio puede formar parte de diversas áreas o en este caso componentes que define la sustentabilidad en carreteras (Mendoza, 2014).



### 2.4.1 Componente Económico.

El componente económico hace referencia al análisis del costo del periodo de vida que tienen las carreteras; Life Cycle Cost Analysis, LCCA por sus siglas en inglés. La metodología del análisis del costo del periodo de vida es una herramienta útil para determinar el conjunto de inversiones que tendrá el proyecto civil durante su uso, desde el planeamiento y diseño hasta la fase de cierre y clausura (Mendoza, 2014).

El LCCA es una herramienta de gran utilidad para cuantificar los gastos requeridos en toda la vida útil de la carretera; a partir de esto, empresas canadienses desarrollaron un software que permite medir información real mediante sensores, datos relacionados con volúmenes de tránsito, pesos de diseño. Incluso sensores que permiten recaudar datos para un control del medio ambiente tales como la temperatura, humedad y precipitación. A su vez se puede monitorear la capa asfáltica (Mendoza, 2014).

Es a partir de estas condiciones que se puede generar modelos predictivos del comportamiento de la carretera que facilitaran un control del desgaste de la misma, conservando la obra civil de manera eficiente, mediante el software anteriormente mencionado y denominado “Know Your Road” (Mendoza, 2014).

El software de “Know Your Road” es utilizado en varios países del mundo, como es el caso de Estados Unidos, México, Islandia, etc. Lo que se debe resaltar es que esta herramienta puede ser aplicada en cualquier país, con el enfoque de reducir costos y ser más eficientes en el mantenimiento de una carretera, alargando la vida útil del pavimento, sea rígido o flexible. Otro ejemplo de un país que maneja un modelo de LCCA es Australia, lo utiliza para la optimización sustentable de proyectos carreteros. La intención es poner a valorar los costos de un proyecto vial, relacionando el mismo con medidas sustentables (Mendoza, 2014).



Actualmente los defensores del medio ambiente y la conservación del mismo están sacando tecnologías con mucha aportación ambiental, no obstante, los gastos se incrementan considerablemente. Es aquí, donde el LCCA es de vital importancia para la selección de decisiones. Es por esto que, en la actualidad a los softwares de LCCA tradicional se les ha enlazado con indicadores de sustentabilidad tales como: impactos sociales, incremento de la vida útil, accidentes de tráfico, calidad del aire, ruido, consumo de recursos y demás (Mendoza, 2014).

Los Sistemas de Gestión de la Calidad (SGC) se rigen a la normativa ISO 9001, en donde la importancia está en que sea incorporada dentro de los procesos de las empresas del sector de carreteras, donde sus algoritmos deben ser relacionados íntegramente con la infraestructura vial delimitada en el SGC (Mendoza, 2014).

En los países con un estándar de calidad alto para construcción, operación y mantenimiento de carreteras, los contratistas deben tener un SGC que analice los siguientes componentes: planes de calidad, política de calidad, metodologías de trabajo, listas de inspección, entre otros. Además, se deben considerar otras variables como la calidad de subcontrataciones y compras, la inspección de las actividades de construcción, inspección de trabajos, capacitaciones, análisis de seguridad, gestión ambiental, etc. (Mendoza, 2014).

Una de las actividades de mayor impacto es el movimiento de tierras, puesto que se debe buscar un equilibrio entre el material de corte y el material de relleno en el proceso de diseño y construcción. Y de esta manera, minimizar la cantidad de acarreos, el gran impacto ambiental y económico, en la medida que reduce el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Mendoza, 2014).



Hoy en día, gracias a los avances tecnológicos, existen softwares tales como: Mudshark, Roctek, Agtek, Quantm y DynaRoad, mismos que permiten el cálculo del balance de corte y relleno y, buscan un equilibrio de volúmenes de tierra. Además, se puede fomentar el uso de materiales de la zona, reduciendo los impactos producidos por el transporte, en otras palabras, se fomentaría la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. Por ello, se considera que los softwares deben ser de uso generalizado en los proyectos de carreteras en todos los países del mundo (Mendoza, 2014).

Otra manera de aportar al factor económico es mediante y a partir del uso de pavimentos de larga duración. En carreteras que serán denominadas sustentables, este es un rubro indispensable para mantener una buena economía en los distintos países. Se ha demostrado que la vida promedio de los pavimentos mencionados oscila alrededor de los 50 años. Según Mendoza (2014), actualmente existen distintas guías técnicas para el manejo de dicho material, como es la guía de la Asociación Europea de Pavimentos de asfalto, misma que enfatiza en los beneficios económicos y de desempeño que conlleva el usar estos materiales de larga duración (Moreno Álvarez, 2018).

Los pavimentos generalmente utilizados en Ecuador son asfaltos, es decir, pavimentos flexibles. A excepción de ciertas zonas o localidades como Guayaquil y parte del Azuay que poseen un porcentaje considerable de pavimento rígido. El uso de pavimentos flexibles puede resultar más económico al momento de su implementación. No obstante, en las etapas de operación y mantenimiento resulta más costoso, puesto que con el tiempo termoenvejece y se destruye con la humedad (Mendoza, 2014).

No obstante, un proyecto de pavimento rígido, al tener contacto con la humedad tiende a tener un proceso de hidratación aumentando la resistencia. Por otro lado, en términos de durabilidad, el pavimento rígido es superior ya que, con un correcto uso y



cumplimiento con las especificaciones técnicas del mismo, puede lograr una vida útil de hasta de 50 años (Mendoza, 2014).

Por ello, es de vital importancia la implementación de prácticas para un desarrollo sustentable en la normativa de carreteras del Ecuador, puesto que en las prácticas actuales referentes a la construcción de carreteras se evidencia que en la fase de construcción presentan gastos inferiores, no obstante, en la fase de operación y mantenimiento demuestran una ineficiencia en comparación con un pavimento rígido, resaltando el precio alto para mejorar la situación. Situación completamente diferente en el caso de la utilización del pavimento rígido, que es normalmente recomendado por todas las organizaciones relacionadas con la sustentabilidad aplicada a proyectos carreteros (Moreno Álvarez, 2018).

#### **2.4.2 Componente Social**

El componente social hace referencia a un correcto uso del plan de mantenimiento del sitio, en el que se debe implementar actividades para que no se afecte la calidad, ni la estética del lugar. Existen distintos programas para realizar un control, midiendo y valorando las actividades de mantenimiento de carreteras, como es el programa desarrollado por el departamento de transporte de Washington (Moreno Álvarez, 2018).

En carreteras sustentables es necesario tener un plan de mantenimiento de la obra civil, misma que de manera integral se debe proveer de personal mínimo, normas, métodos y horarios que cuenten con una financiación responsable para realizar actividades básicas de mantenimiento tales como: limpieza y mantenimiento del sistema de alcantarillado, limpieza de veredas, mantenimiento de plantas en caso de tenerlas, bacheo, reparación de grietas, mantenimiento de la capa asfáltica en general, mantenimiento de la señalética,



mantenimiento de la iluminación de la carretera, entre otras acciones que se deben tomar en función de la carretera específica que se analice (Moreno Álvarez, 2018).

Dicho plan de manejo y mantenimiento de la carretera debe operarse durante todo el tiempo de vida que se le ha asignado a la obra civil. Es decir, la planeación implica el correcto desarrollo de proyectos que de manera integral satisfagan las necesidades de la carretera, para que el transporte y tránsito sean cómodos y seguros; además, de mantener los valores de la comunidad a través de eficiencia en la toma de decisiones tempranas en un diseño sustentable, eficiente e inteligente.

El término “Soluciones sensibles al contexto” (CSS) hace referencia al enfoque práctico y teórico para el tránsito, transporte y diseño que tiene como variables a las comunidades y el uso del suelo por donde pasaran las carreteras. Además, las CSS si bien están directamente relacionadas con el diseño, hace énfasis en planeación y desarrollo de proyectos para la correcta operación y mantenimiento siendo sensible al impacto que generan dichas actividades no solo en el diseño. Promueven el equilibrio entre el transporte y tránsito de manera segura y eficiente, con otras consecuencias deseables como son: el mantenimiento de sitio históricos, la creación de espacios públicos y a su vez la sustentabilidad ambiental (Moreno Álvarez, 2018).

Mejorar la salud del ser humano por minimizar el ruido producido por el contacto del pavimento con la llanta, es un factor que se considera como sustentable para las carreteras. Existen diversos estudios donde se modificaron las mezclas asfálticas con el fin de hallar un ligante en los pavimentos que los haga silenciosos. ECOPATH estudia el comportamiento de la mezcla utilizando polvo de neumáticos y ha tenido grandes avances con dicho proyecto (Mendoza, 2014).



Por su parte la Asociación Mundial de la Carretera, desarrolló un informe técnico donde se analizaron las distintas tecnologías para pavimentos silenciosos. En el mismo se estipula que la capa superficial es parte crítica para reducir las ondas sonoras del ruido ocasionado por la interacción pavimento-llanta. Dentro de dicho informe técnico, se presentan las soluciones consideradas más sustentables entre ellos: los pavimentos porosos, el pavimento con caucho y, se habla de una posible mezcla entre los dos, en donde se tenga concreto poroso con caucho (Moreno Álvarez, 2018).

Otro de los problemas del componente social es la contaminación lumínica, mismo que aumenta con creces en la actualidad. La operación durante horas de la noche con vehículos y la necesidad de que la carretera esta iluminada para seguridad del conductor produce un mayor consumo energético. Es por esto que se determinó que una carretera sustentable debe de contar con un sistema de iluminación no convencional, como podría ser con lámparas de sodio, descartando las convencionales de mercurio que se caracterizan por su alto consumo de electricidad y una vez que terminan su vida útil considerarse un desecho peligroso (Moreno Álvarez, 2018).

Otra problemática es la emisión de CO<sub>2</sub> por parte de los vehículos, es por esto que en la actualidad existen tantas normativas para regular la emisión del mismo. Además de regularse el consumo de combustible que es un factor directamente proporcional de la emisión de CO<sub>2</sub>. Es por esto que múltiples organismos fomentan la movilidad peatonal, como es el caso de la AASHTO, que desarrolló una guía para la planeación, diseño y mantenimiento de instalaciones peatonales, para promover buenas prácticas para conseguir la movilidad segura de los peatones. Tanto es la importancia de este tema que, en los Estados Unidos, en varios estados se cuenta con manuales para la correcta incorporación de peatones al sistema transportista, donde se recomienda vías peatonales



con medidas de seguridad como que estén paralelas a la carretera con una distancia de 1.5 m. (Moreno Álvarez, 2018).

Otra medida es promover el uso y preferencia del transporte público, misma acción es considerada un criterio de sustentabilidad. La AASHTO, tiene un manual desarrollado para guiar el diseño de las distintas instalaciones de alta ocupación (HOV). La misma cuenta con instrucciones para el planeamiento y operación exitosa de carriles destinados al transporte público en carreteras. Por otro lado, en Canadá los carriles para transporte público masivo están diseñados para descongestionar áreas normalmente saturadas por el tráfico, aliviando la misma en carriles regulares, con la optimización de vehículos, movilizandando una mayor cantidad de personas en menos vehículos (Mendoza, 2014).

Las bicicletas, por otro lado, también forman un papel fundamental para el desarrollo sustentable en carreteras. Mejoran la calidad de vida de los usuarios de este transporte, reducen el consumo de combustibles fósiles y consecuentemente, reducen la emisión de gases de efecto invernadero. Si se desea conseguir un transporte sustentable, es necesario promover el uso de la bicicleta de manera efectiva mediante la correcta planificación y provisión de infraestructura de circulación (Moreno Álvarez, 2018).

### **2.4.3 Componente Técnico.**

El Diseño geométrico de carreteras sustentable permite que se logre integrar de manera correcta, muchos de los componentes de la sustentabilidad, por lo que después de cursar las asignaturas de la Carrera de Ingeniería Civil podemos aseverar que: Un buen diseño geométrico de carreteras potencia directamente todos los criterios de sustentabilidad (Moreno Álvarez, 2018).

Las carreteras deben ser diseñadas con el fin de generar rutas eficientes entre el origen y el destino, generar caminos directos y a su vez rutas alternativas permitirán que el tránsito



sea distribuido de manera correcta, se evitará saturar la capacidad de las carreteras y los tiempos de recorrido serán más eficientes (Moreno Álvarez, 2018).

Si se logra generar menores tiempos de recorrido se obtendrá en consecuencia un menor consumo de combustibles fósiles, minimizando la generación de gases de efecto invernadero y provocando que los conductores pierdan menos tiempo en viajes. Las carreteras de rutas principales deben ampliarse según la demanda para conseguir mayores velocidades y ser eficientes en horas pico de tránsito. El trazado de las carreteras debe generar la densidad adecuada de tránsito para permitir el movimiento del mismo durante las horas pico de transporte (Moreno Álvarez, 2018).

Los sistemas de estacionamiento deberán diseñarse para funcionar conjuntamente con la carretera y la red peatonal, de manera que se genere una red de transporte sustentable, en el caso de requerimientos urbanos.

Otra medida a tomar en cuenta son los límites de velocidad, ya que estos deberán de permitir el tránsito fluido garantizando la seguridad de los conductores y la de los peatones. Los límites de velocidad deberán ser condicionados según el área y el uso del suelo por donde vaya a pasar la carretera (Moreno Álvarez, 2018).

Si bien los límites de velocidad demasiado elevados pueden considerarse de cierta manera peligrosos, los límites que sean demasiado bajos, asimismo, serán perjudiciales pues generan congestión de tránsito y un aumento desmedido en los tiempos de viaje y en consecuencia genera un mayor consumo de combustibles fósiles y generación de gases de efecto invernadero (Moreno Álvarez, 2018).

Si bien la mayor parte de países cuenta con manuales de diseño geométrico de carreteras, los mismos necesitan ser modificados para cambiar las variables de diseño que aumenten



los impactos negativos, como son: la emisión de gases de efecto invernadero, el excesivo consumo de combustible, la generación de ruido, entre otros.

Tener un correcto análisis del periodo de vida del proyecto permite realizar un correcto inventario del mismo, que servirá como herramienta para identificar y cuantificar los impactos ambientales asociados a los procesos dentro de la vida de la carretera, a su vez con un inventario se podrá integrar y complementar los procesos realizados (Moreno Álvarez, 2018).

Por otro lado, se debe de controlar la emisión de gases de efecto invernadero. La Federación Internacional de Carreteras generó un programa para la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero en los procesos de proyectos de carreteras, dicho software fue denominado CHARGER, genera un análisis ambiental de los procesos constructivos de proyectos de carreteras mediante el cálculo del total de emisiones de gases de efecto invernadero, generados por las acciones dentro del proceso constructivo. Este software tiene dos etapas importantes, la primera que aproxima las emisiones de gases de efecto invernadero durante la construcción y la segunda etapa que calcula los impactos generados en la pavimentación en sí (Mendoza, 2014).

En todo proyecto de carreteras sustentables debe generarse un Plan de Control de Calidad, que es el conjunto de procedimientos para realizar las actividades que generen un producto final, que deberá cumplir con las expectativas del cliente, según las estipulaciones del contrato. Dicho contrato deberá estipular a las personas o la organización responsable del control de calidad. Además de los procedimientos que aseguren la entrega del producto final. Dicho plan de control medirá la calidad y detallará el método de reporte, así como la documentación necesaria. En Estados Unidos existe un



“modelo sobre el plan del control de la calidad para las obras del Departamento de Tránsito” (Mendoza, 2014).

El manejo de residuos es otra problemática dentro de una carretera, deben existir planes que soporten la sustentabilidad, dichos planes son de carácter obligatorio en muchos países, pero aún es una temática en desarrollo. En Reino Unido mediante la Agencia de Carreteras existen reportes anuales de los residuos generados en el sector constructivo (Mendoza, 2014).

Para poder denominar un proyecto carretero como sustentable debe existir un análisis integral del ciclo hidrológico en el área de afección de la carretera. El fin de generar una correcta evaluación del ciclo hidrológico es cuantificar el nivel de control para lograr las metas de gestión de aguas pluviales en la zona. El nivel óptimo de control se puede alcanzar mediante el uso de distintas herramientas hidrológicas durante el proceso de planificación para un correcto manejo y control (Mendoza, 2014).

El análisis hidrológico se realiza mediante la modelación técnica y analítica de la zona en función de las estaciones pluviométricas de la zona, topografía y tipología de los suelos. Este modelamiento dará como resultado el volumen de escorrentía, la escorrentía pico, la frecuencia y el control de la calidad del agua (Mendoza, 2014).

En la mayoría de países cuando se realiza un proyecto de carreteras se genera un estudio hidrológico de la zona en donde se emplazará el proyecto carretero, con el objetivo de planificar y diseñar obras de drenaje en el largo de la carretera, para protección y un correcto manejo del agua pluvial. Una de las problemáticas existentes es que, si bien, la gran mayoría de países realiza un análisis hidrológico para el diseño de las Carreteras, muy pocos cuentan con normativa específica para realizar dicho análisis en las carreteras (Moreno Álvarez, 2018).



Otra práctica que ayuda a definir una carretera como sustentable, es el uso de materiales reciclados para cumplir con el número estructural en el diseño. No obstante, tiene demasiadas problemáticas, entre ellas: la desconfianza y la percepción de riesgo al evidenciar el uso de materiales reciclados. Además, no existe una disponibilidad continua de los materiales y muchas veces en lugar de favorecer la economía termina perjudicando (Moreno Álvarez, 2018).

También se debe de minimizar la generación de residuos provenientes de la construcción que sean destinados a vertederos, buscar las buenas prácticas ambientales desde la generación de residuos. Es por esto que se debe generar un plan de manejo integral de los residuos generados en la etapa constructiva, donde se disponga de un sitio para disposición y almacenamiento de los escombros. Este plan de reciclaje debe ser correctamente implementado realizando seguimiento del mismo durante todo su proceso (Moreno Álvarez, 2018).

La reducción del uso de combustibles fósiles es también una actividad que debe ser tomada en cuenta si se desea generar carreteras sustentables. Existen múltiples operaciones que se pueden realizar para reducir el consumo de los mismos como es la reducción de la temperatura máxima del asfalto en su etapa de mezcla y producción. De esta manera, se permite la reducción del consumo de combustibles, ya que requiere una menor cantidad de energía para calentar los minerales y asfaltos, sin perjudicar la calidad de los mismos. Además, se asegura la salud de los trabajadores, puesto que al trabajar con una menor temperatura se generarán menos cantidad de gases, producto de la mezcla asfáltica, y menor intoxicación a los trabajadores de la zona (Moreno Álvarez, 2018).

En la actualidad existen una serie de modelos de maquinaria pesada que incluyen el accionamiento eléctrico como es el tractor de oruga D7E construido por Caterpillar. Este



tiene accionamiento eléctrico que aumenta la eficiencia en un 25%, disminuyendo costos operativos hasta un 10% y utilizando menor cantidad de piezas y líquidos durante su vida útil. También, reduce el CO<sub>2</sub> emitido por la maquinaria típica, con lo que estaría ayudando al medio ambiente con un correcto desarrollo mecánico (Moreno Álvarez, 2018).

Al hablar de control en los vehículos que circulan en las carreteras es netamente un tema legal, en donde las autoridades deben de imponer el cumplimiento de alguna normativa ambiental como la regulación EURO.

Todas las carreteras sustentables deben contar con un sistema de gestión de pavimentos, ya que con ello se tendrá una operación integral correcta de la carretera, un proceso de mantenimiento y acondicionamiento de la misma, y asimismo puede plantearse para una red de carreteras. Estos procesos deberían medir la condición del pavimento de manera regular, por lo menos una vez cada dos años, poseer un plan de manejo para cronometrar las acciones de reparación y tener registro de todas las acciones tomadas en la carretera para que sea correctamente administrada (Moreno Álvarez, 2018).

#### **2.4.4 Componente Ambiental**

En este componente se estudia la evaluación de impactos ambientales generados por las distintas fases de un proyecto carretero. Misma que se aplica en la mayor parte de los países, pero no siempre controlada de una manera óptima. Esta actividad debería ser obligatoria e incluida desde la planeación del proyecto (Moreno Álvarez, 2018).

El primer país que innovó con la evaluación de impactos ambientales fue Estados Unidos en los 70s. Con el pasar de los años, estos estudios fueron incluidos en varios países hasta llegar a América latina. Actualmente, Ecuador es un país que cuenta con este proceso (Moreno Álvarez, 2018).



La evaluación de impacto ambiental no debe estudiar y calificar únicamente el impacto que puede generar la implementación o construcción de una carretera. En este caso, se debería proponer buenas prácticas para minimizar los impactos ambientales sin afectar el componente técnico de una carretera. Por ello, debe existir una correcta integración del componente ambiental y el componente técnico de una carretera (Moreno Álvarez, 2018).

Por su parte, España ha generado varias publicaciones para que en la etapa de planeación de proyectos carreteros se consideren posibles medidas en caso de presentarse diversas situaciones entre ellas atravesar o bordear un área protegida. Según el informe “Integración Ambiental”, la Asociación Española de Carreteras propone ciertas prácticas a considerar en estos casos tales como: aumentar la permeabilidad transversal de las secciones de las carreteras para disminuir el efecto muro de la misma mediante un correcto diseño de puentes y viaductos, inclusión de túneles falsos, adecuación y planeación de obras de drenaje, construcción de pasos para la fauna silvestre de la zona, compensación del movimiento de tierras, reducción de las pendientes en los taludes para evitar erosión, protección de los sistemas hidrológicos, planificación de proyectos de restauración paisajística, que el derecho de vía sea menor en zonas protegidas (Moreno Álvarez, 2018).

El uso de herramientas para medir los efectos ambientales y económicos de las carreteras ha crecido en la última década tras la inversión de diversas entidades tanto públicas como privadas. Como es el caso de EUA que generó una herramienta llamada PALATE que opera con base a Excel para el análisis del periodo de vida de la carretera. El programa toma datos del diseño, de la construcción en fase inicial, del plan de mantenimiento, equipos disponibles y los costos del proyecto. Con toda la información genera como resultados los costos y efectos ambientales que se presentarán en el periodo entero de vida



de la carretera, tales como: Emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, todos los lixiviados en general (Moreno Álvarez, 2018).

Otra acción que aumenta la sustentabilidad en un proyecto de carreteras es el control del ruido, es por esto que FHWA generó un manual para un correcto control del mismo en la construcción de carreteras, en el mismo se describen los impactos del ruido que son producidos en la construcción de carreteras, además sugiere medidas efectivas para atenuar el ruido durante los procesos constructivos de las carreteras (Moreno Álvarez, 2018).

Se debe realizar un correcto escurrimiento de las aguas lluvias para no afectar la calidad de la misma. En los EEUU la organización “East-West Gateway Council of Governments” publicó un informe para los escurrimientos en las carreteras analizando la afección a la calidad del agua. Los impactos son producidos durante la precipitación y se clasifican en: sedimentos durante la fase constructiva de carreteras, restos de combustibles, pesticidas derivados de los suelos agrícolas lindantes de la carretera, aceites y residuos químicos del paso de los automóviles, virus y bacterias de los sistemas hidráulicos, químicos utilizados en carreteras invernales (Moreno Álvarez, 2018).

El correcto control de la escorrentía de aguas superficiales en las carreteras y puentes vehiculares es fundamental para impedir su contaminación mediante el acarreo de sedimentos que provocan erosión en taludes. Se debe de contar con un plan de un correcto control de erosión, que incorpora las prácticas de manejo más adecuadas y rentables, esenciales para el control de los flujos superficiales.

La Agencia de transporte de Nueva Zelanda generó un estudio para valorar los escurrimientos del agua pluvial, donde según el estudio, las escorrentías derivadas de las carreteras en funcionamiento presentaron de 40% a 50% de contaminación por metales



como el zinc y cobre provenientes de los vehículos. Los estudios se localizan enmarcados en el programa de la administración del agua pluvial de la agencia, mismos que realizan periódicamente para analizar posibles impactos ambientales (Moreno Álvarez, 2018).

#### **2.4.5 Componente Seguridad**

Este componente relacionado con las carreteras hace referencia a la prevención de accidentes de tránsito o la minimización de sus efectos cuando tuviera lugar un accidente o incidente de tránsito. La seguridad se refiere a aquello que está exento de peligro, daño o riesgo. Así pues, la definición de seguridad vial es sinónimo de prevención de accidentes de tráfico. La seguridad vial tiene especial cuidado con los efectos que dichos incidentes pueden tener para la vida y la salud de las personas (Moreno Álvarez, 2018).



### **3 CAPITULO TERCERO. SUSTENTABILIDAD EN DISEÑO GEOMÉTRICO**

Como se presentó en el primer capítulo del presente trabajo de titulación las carreteras nacen de una necesidad, misma que al ser suplida facilita el transporte y comunicación de individuos, fomentando las actividades humanas y el desarrollo económico de las comunidades intervenidas por el proyecto.

A lo largo de la historia el ser humano ha construido caminos para solventar sus necesidades, desde senderos estrechos hasta la actualidad que se han construido autopistas de alto tráfico. En esta transición, el ser humano se vio en la necesidad de generar parámetros para planificar y diseñar la carretera de tal manera que se mejore la eficiencia de la misma.

El autor Pedro Chocontá (2004) define al diseño geométrico como el “proceso de correlacionar los elementos físicos de la vía con las condiciones de operación de los vehículos y las características del terreno”; En el diseño geométrico de una carretera, es necesario establecer las posibles relaciones con los usuarios (peatones, ciclistas, vehiculares).

El presente capítulo tiene por objetivo relacionar los componentes de la sustentabilidad a los componentes del diseño geométrico de carreteras con la intención de que las infraestructuras viales representen un impacto positivo tanto en el aspecto ambiental, social, y económico. Además, que sus características sean adecuadas fomentando la funcionalidad, seguridad, y comodidad.

#### **3.1 Factores que intervienen en el Diseño Geométrico y Sustentabilidad**

Los factores dentro del diseño geométrico de carreteras influyen en el diseño definitivo de manera directa, limitarán y condicionarán el campo de acción del diseñador. Estos se clasifican en externos e internos. (Agudelo Ospina, 2002)



### **3.1.1 Factores Externos y Sustentabilidad**

Los factores externos de diseño corresponden a las condicionantes preexistentes al proyecto que limitarán de cierta manera el diseño. No obstante, mediante una correcta obtención de información de los factores se puede analizar y promover características idóneas para el proyecto carretero.

#### **3.1.1.1 Topografía del terreno natural**

La topografía de la zona donde será emplazado el proyecto carretero es un factor de alto impacto a la sustentabilidad puesto que condiciona directamente el alineamiento horizontal de un proyecto, las pendientes. Es decir, condiciona el nivel de servicio carretero que se puede brindar a las partes beneficiadas (Choconta Rojas, 2004).

En los proyectos realizados en terrenos planos, las carreteras tenderán a ser rectas respetando las distancias máximas de entretangencias, generando cambios de dirección para llegar a ciertos puntos o evitar otros, no presentarán mayor dificultad en el alineamiento horizontal y no se generará mayor corte en el diseño de la carretera. Al contrario, generalmente cuando se trabaja en zonas costeras, el mayor gasto será para realizar terraplenes. Además, las vías emplazadas en esta tipología de terrenos presentarán un reto para el drenaje de aguas, puesto que al no existir mayor pendientes se dificulta la evacuación de aguas lluvias.

Los proyectos en terrenos ondulados son los de menor dificultad en el diseño carretero. Al analizarse únicamente la topografía, las dificultades que se pueden presentar son fáciles de superar puesto que presenta las características idóneas para brindar cualquier nivel de servicio carretero, en la medida que sus pendientes son cómodas para el trazado geométrico y para la evacuación de aguas lluvias.



Los proyectos en terrenos accidentados y muy accidentados son los que presentan mayores limitaciones para el diseño geométrico. Las subidas y bajadas con pendientes altas dificultan el trazado, a su vez provocan un exceso de curvas y las entretangencias tienden a la entretangencia mínima permitida, incluso pueden llegar a ser menores. Se puede optimizar el diseño manejando volúmenes de corte altos, pero esta acción puede ser objetable desde el punto de vista económico.

### **3.1.1.2 Conformación Geológica y Geotécnica**

“La geología es la ciencia que estudia el planeta Tierra, su origen, formación y evolución, los elementos que lo componen y su estructura; especialmente, las rocas, los procesos que le dan origen y moldean su forma actual y, desde el interés del ingeniero civil, los productos o “materiales pétreos” que de ellas se pueden obtener” (Del Gener, 2019).

La Geología y la Geotécnica de la zona condicionan el diseño sustentable de una carretera, en la medida que sus características serán parte de estudios críticos en la fase de la prefactibilidad del proyecto. En este sentido, inicialmente, se realizará un estudio del territorio por parte de un técnico competente. De modo que, permitirá la selección de sectores estratégicos para el emplazamiento del proyecto en base a diversas variables, entre ellas: topografía, alineamiento horizontal, alineamiento vertical, usos de suelo (áreas restringidas), clasificación de suelo, entre otros.

Estas variables permitirán, incluso, identificar aquellos espacios como minas de materiales que permita aprovechar el material para ser parte de la estructura de la vía (subrasante - mejoramiento - subbase - base).

### **3.1.1.3 Características del tránsito actual y futuro**

El tráfico es un factor que influye directamente en el dimensionamiento y caracterización geométrica de la carretera en proyecto. Es por ello, que es importante la determinación



del tráfico vehicular para indicar la cantidad de vehículos que un proyecto carretero podrá soportar en su vida útil. Además, la composición del tráfico será un factor a considerar para la definición de las características geométricas del proyecto, puesto que define el tamaño y el peso de los vehículos que podrán transitar.

#### **3.1.1.4 Impactos Ambientales**

El estudio de los impactos ambientales es un componente indispensable a considerar dentro del diseño geométrico de carreteras, puesto que en este campo se analizan los impactos ambientales positivos y negativos que generará el proyecto, a su vez este estudio se valorará estos criterios para definir si el proyecto es sustentable.

#### **3.1.1.5 Climatología**

En todo diseño geométrico de carreteras existe una relación entre el clima y el proyecto, puesto que las condiciones climáticas como la precipitación, el viento o la temperatura afectan de manera directa al diseño de la carretera.

Por ejemplo, en el diseño del drenaje considera un análisis hidrológico de la zona donde se emplazará el proyecto. En el caso del dimensionamiento de los puentes con respecto a las fuerzas horizontales que actúan en el mismo parte del análisis de las cargas del viento que se determinarán en función de un análisis de la zona donde será emplazado el proyecto.

#### **3.1.1.6 Planes de desarrollo y ordenamiento territorial y Planes de uso y gestión del suelo**

Los planes de desarrollo y ordenamiento territorial identifican las problemáticas existentes a nivel provincial, municipal y parroquial, en el marco de los componentes ambiental, sociocultural, económico, asentamientos humanos, político; para posteriormente solventarlos con proyectos. En el caso de medio físico, se determina las



categorías de ordenamiento territorial, mismo que especifica las actividades que se implementarán en cada una de ellas. Por su parte, los planes de uso y gestión de suelo definen las características de ocupación (número de pisos, retiros, dimensiones de lotes, entre otros) y uso de suelo de acuerdo a los sectores de planeamiento identificados de las zonas urbanas.

En este sentido, estos dos instrumentos de planificación a nivel cantonal y a nivel urbano respectivamente, deben ser considerados para el trazado vial de un proyecto, con la finalidad de no afectar a la planificación existente, así como evitar impactos negativos con la implantación del proyecto en el territorio.

### **3.1.2 Factores Internos y Sustentabilidad**

Los factores internos son aquellos condicionantes propios a la carretera. Estos dependen en cierta medida de los factores externos y de la tipología de la vía que se ha definido en etapas preliminares del proyecto.

#### **3.1.2.1 Velocidad**

La velocidad hace referencia a la distancia recorrida en una unidad de tiempo (m/s). Por tanto, dependerá de la velocidad, el tiempo para el traslado de los usuarios de un punto a otro. Así como influirán externamente en la velocidad, las características geométricas de la carretera y su nivel de servicio, el estado del vehículo, el tráfico existente, límites de velocidad, reductores de velocidad, entre otros.

En este marco, la velocidad de diseño es un elemento indispensable dentro del características geométricas de la carretera y una variable de cálculo requirente para varios parámetros de diseño. Previamente, se define el trazado de la carretera en función de la jerarquía vial y los factores externos, mismos que deben ser analizados para generar un



funcionamiento equilibrado e integral dentro del diseño de proyecto carretero, de manera que garantice la seguridad de los usuarios en la etapa de operación del proyecto.

La velocidad específica, por su parte, es la máxima velocidad que puede mantenerse a lo largo de un tramo analizado de manera individual en la carretera, manteniendo la seguridad y comodidad del operador, esta depende directamente de la geometría de la carretera en el tramo analizado.

La velocidad, desde la perspectiva de la sustentabilidad, es un factor que altera de manera directa. Puesto que, a mayor velocidad dentro del diseño geométrico, menor tiempo en el traslado de un punto a otro, disminuyendo la emisión de gases de efecto invernadero por parte de los vehículos. Por otro lado, las velocidades más altas, a su vez, significan mayor comodidad y eficiencia técnica en la operación de la misma. No obstante, como se mencionó con anterioridad, se limitará al nivel de servicio requerido y el presupuesto del proyecto.

### **3.1.2.2 Radio**

Este empalmará la línea de ceros en sus vértices. Será definido según la tipología de la vía en donde se condicionará un radio mínimo para el trazado. Este es el límite para una velocidad específica del vehículo, calculado a partir del peralte máximo y el coeficiente de fricción transversal máximo. Este valor deberá de ser utilizado en situaciones extremas en donde sea imposible la implementación de un radio mayor.

Este es un factor que influye directamente al componente técnico y de seguridad, puesto que, al manejar radios mayores al *mínimo permisible* se está generando mayor comodidad y seguridad para el operador. Derivándose un diseño más eficiente, en la medida que permite el uso de mayores velocidades específicas en los tramos de las curvas, y minimiza tiempos.



### 3.1.2.3 Pendientes

Dentro del diseño geométrico de carreteras, la pendiente referencia a la inclinación del eje de la carretera diseñada. La pendiente máxima se define a partir del nivel de servicio requerido del proyecto. Las pendientes del eje de la carretera afectan la velocidad de operación de los vehículos. La única que no afecta a la velocidad de operación del vehículo es la pendiente 0, es decir, un tramo completamente horizontal. No obstante, la pendiente es un absurdo, ya que mantenerla durante el trazado de la carretera dificulta e incluso imposibilita el diseño hidráulico.

Si la pendiente es negativa, los conductores tendrán que controlar el desarrollo de la velocidad por razones de seguridad, puesto que el peso actuante en la componente paralela a la vía actuará a favor de la tracción y, si es positiva, el peso del vehículo que actúe en la componente paralela a la vía se opondrá a la tracción del vehículo y, este tendrá que generar mayor esfuerzo para mantener una velocidad.

Desde el punto de vista sustentable se debe evitar pendientes muy altas y si no es posible se debe buscar limitar al máximo la longitud de las mismas, ya que pendientes muy altas positivas limitarían la velocidad de operación de los vehículos, especialmente en los vehículos pesados generando mayor tiempo de viaje, consumo de combustible y generación de gases de efecto invernadero, además en vías de un solo carril por sentido afectan a su vez a todos los vehículos que quedan embotellados detrás del vehículo pesado multiplicando así las complicaciones generadas. Por otro lado, pendientes muy altas negativas comprometen de manera directa la seguridad de la operación de los vehículos ya que estas pendientes generan fuerzas a favor de la tracción, pudiendo provocar velocidades mayores a la máxima específica y ocasionar accidentes en las curvas de la vía, estas también afectan mayor mente a los vehículos pesados por la fuerza que genera su peso propio, obligándoles a ir a velocidades menores a la de diseño por seguridad.



#### **3.1.2.4 Peralte**

El peralte es la pendiente transversal que se da a una curva dentro del diseño geométrico de la carretera, con el objeto de controlar la fuerza centrífuga y que el vehículo no se descarrile de la vía. Cuando el vehículo transita a lo largo de una curva en la carretera este es expuesto a varias fuerzas; la fuerza a causa de su peso propio, la fuerza motriz que es la que actúa en su sentido longitudinal, la fuerza centrífuga por causa de la curvatura que esta radicalmente hacia afuera y la fuerza provocada por el contacto de la llanta y la superficie del pavimento, esta fuerza es opuesta a la centrífuga.

El peralte afecta de manera directa al componente de la seguridad ya que al levantar el borde exterior de la calzada el peso del vehículo se descompone en dos fuerzas; una que paralela a la superficie de las vías que contrarresta la fuerza centrífuga y otra que actúa como normal que también contrarresta a la fuerza centrífuga. Es por esto que el análisis correcto del peralte en cada curva es importante para asegurar la comodidad y seguridad del usuario de la carretera, siendo eficientes técnicamente y permitiendo mayores radios de curvatura y por ende mayores velocidades de operación sin comprometer la seguridad, ese es un análisis técnico eficiente.

#### **3.2 Diseño Geométrico Horizontal y Sustentabilidad.**

El diseño geométrico en planta de una carretera, o alineamiento horizontal, es la proyección sobre un plano horizontal de su eje real o espacial. Dicho eje horizontal está constituido por una serie de tramos rectos denominados tangentes, enlazados entre sí por curvas (Cardenas Grisales, 2013).

En esta etapa del diseño geométrico de carreteras se debe de buscar una relación integrada de los componentes de la sustentabilidad de tal manera que el proyecto diseñado se pueda



construir y operar con la máxima economía y utilidad, garantizando condiciones óptimas para la generación actual y futura.

### **3.2.1 Línea de Ceros y selección de rutas Sustentables**

Dentro del diseño geométrico de una carretera previo al trazado de la línea de ceros (línea que une los puntos obligados del proyecto con pendiente igual o mejor a la especificada en el proyecto) se debe realizar un análisis de los posibles corredores por donde pueda realizarse el trasado de la carretera, para previamente al trazado seleccionar las franjas que mejor sirvan de acuerdo con las especificaciones técnicas, ambientales, sociales y la seguridad respetando las limitaciones económicas que se condicionen en el proyecto.

Posteriormente a el reconocimiento de las posibles franjas más factibles para el trazado se debe de realizar un trazado preliminar donde se realizará el trazado de una serie de líneas de ceros que sirva como una aproximación de eje de vía sobre cada una de las pocas rutas que se hayan analizado como sustentables.

Una vez definidos los trazados preliminares el equipo consultor deberá de hacer un análisis para determinar la o las rutas que aparentemente sean las más eficientes y merezcan un estudio más profundo, a esta actividad se le denomina “selección de ruta” y es aquí donde se realizara un acopio de datos de la zona de estudio como son: topografía, hidrología, geología, usos de tierra, etc. Además, se realizará un análisis de planos, reconocimiento terrestre y realiza el levantamiento topográfico de la franja de los alineamientos estudiados.

### **3.2.2 Ajuste de línea de Ceros Sustentable**

Una vez de la obtención de la línea de ceros se debe ajustar de acuerdo a algunas pautas y criterios:



- Seguir la misma dirección, pero obteniendo tangentes tan largas como sea posible sin superar los 1500 metros.
- Evitar curvas continuas que tengan el mismo sentido puesto que el conductor normalmente provee encontrar una curva en sentido contrario la que acaba de pasar, una solución cuando se tiene dos curvas seguidas con el mismo sentido es hacer de estas dos una sola entretangencia revisando el corte y relleno que se generaría con esta acción.
- Cuando la línea de ceros es demasiado quebrada se puede emplazar una o varias rectas rodeando este vértice alejándonos de la línea principal.
- Procurar que los cruces en los ríos y corrientes de agua sean perpendiculares a las curvas de nivel y por los sitios más estrechos.

### **3.2.3 Diseño horizontal Sustentable**

El diseño geométrico horizontal se resume en el trazado de la línea de ceros y el empalme de las poligonales que compone la misma, desde el trazado de la línea de ceros se debe de buscar generar un proyecto con la menor distancia posible ya que esta repercutirá de manera directa en el costo del mismo, a su vez como se definió previamente en el presente trabajo existe una influencia directa de la topografía natural del terreno entonces se debe buscar zonas por donde sea más cómodo el trazado de la carretera, proyectando constantemente a obtener volúmenes de movimiento de tierras lo más pequeños posibles.

Un correcto análisis de la información geológica, de los usos de suelos es imprescindible para un correcto trazado del alineamiento, buscando siempre aprovechar los recursos propios del proyecto y priorizar pasar por las zonas más estables a fin de economizar el proyecto, tener presente el uso de suelos de la zona para no generar impactos negativos ambientales o sociales con el trazado del alineamiento, no obstante como el proyecto



tendrá un estudio ambiental no habrá mayor problema con las zonas protegidas o vulnerables ambientalmente, socialmente un proyecto carretero generalmente será bien recibido por las comunidades de la zona por los beneficios que otorga no obstante se recomienda generar un plan de socialización con la comunidades que serán afectadas por el proyecto, para contar con el apoyo de las mismas durante la fase de construcción.

Se debe de buscar generar entretangencias lo más largas posibles sin superar la máxima admitida, para generar mayor comodidad y de ser permitido por la pendiente del alineamiento generar mayores velocidades y los beneficios que otorga la misma.

Con respecto a la seguridad el trazado horizontal se ve influenciado directamente con los radios de curvatura que se use. Como expone (Mendoza Diaz, 2002) en “Alguna Consideraciones de Seguridad para el Proyecto Geométrico de Carreteras” es mas probable que se den los accidentes de tránsito en las curvas que en las tangentes, porque entran dos aspectos de riesgo en la transición de la curva; la fuerza centrífuga y la distancia de visibilidad en la misma, la frecuencia promedio de accidentes en segmentos de curvas horizontales es tres veces la de segmentos en tangente. Los segmentos en curva suelen tener mayor porcentaje de accidentes cuando la superficie esta mojada por esto es indispensable un correcto diseño para la evacuación de aguas lluvias para no factorizar el riesgo que representa las superficies mojadas.

Existe una relación directa entre las curvas horizontales y los accidentes; inclusive, han identificado varias características geométricas, de la sección transversal y del tránsito, relacionadas con la seguridad vial de las curvas horizontales, prestando atención al radio y la longitud de la curva, la intensidad vehicular, el ancho de carriles y acotamientos, los peligros en las zonas laterales, la distancia de visibilidad de frenado, el alineamiento vertical en las curvas horizontales, la distancia a curvas adyacentes, la distancia a



intersecciones cercanas, la presencia de dispositivos para el control del tránsito, etc (Mendoza Diaz, 2002).

Entonces a sabiendas de estas estadística y a partir del diseño geométrico se debe de controlar los radios de curvatura y la longitud de la misma, buscando utilizar minimamente el radio mínimo determinado por el nivel de servicio del proyecto, proponer mayores dimensiones del ancho del carril y posteriormente con la señalética o infraestructura de seguridad vial buscar impedir que los conductores revasen en la transición de las curvas, analizar los posibles beneficios al generar un “suavizamiento” de las curvas ya trazadas.

### **3.3 Diseño Geométrico Vertical y Sustentabilidad**

“El diseño geométrico vertical de una carretera, o alineamiento en perfil, es la proyección del eje real o espacial de la vía sobre una superficie vertical paralela al mismo. Debido a este paralelismo, dicha proyección mostrará la longitud real del eje de la vía. A este eje también se le denomina rasante o subrasante” (Cardenas Grisales, 2013).

Lo idóneo es la obtención de rasantes largas con un ajuste óptimo de curvas verticales y curvas horizontales a las condiciones del tránsito y a las características del terreno, generando un proyecto lo más económico posible tanto en su construcción como para su operación generando un equilibrio óptimo entre los componentes de la sustentabilidad.

#### **3.3.1 Elementos Geométricos que Integran el Alineamiento vertical.**

Al igual que el diseño horizontal de la carretera, el eje del alineamiento vertical está constituido por una serie de poligonales rectas denominados tangentes verticales, enlazados entre sí por curvas verticales.



## Tangentes Verticales

Las tangentes sobre un plano vertical se caracterizan por su longitud y su pendiente, y están limitadas por dos curvas sucesivas. De acuerdo con la Figura 15, la longitud  $T_v$  de una tangente vertical es la distancia medida horizontalmente entre el fin de la curva anterior y el principio de la siguiente.

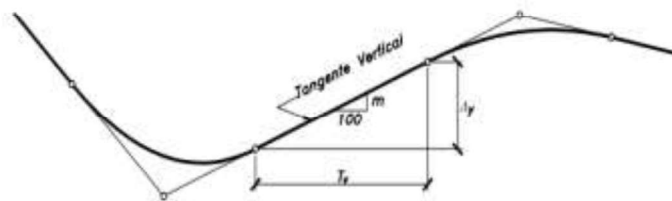


Ilustración 15. Tangente Vertical.

Fuente: (Cardenas Grisales, 2013)

## Curvas verticales

“Una curva vertical es aquel elemento del diseño en perfil que permite el enlace de dos tangentes verticales consecutivas, tal que a lo largo de su longitud se efectúa el cambio gradual de la pendiente de la tangente de entrada a la pendiente de la tangente de salida, de tal forma que facilite una operación vehicular segura y confortable, que sea de apariencia agradable y que permita un drenaje adecuado. Se ha comprobado que la curva que mejor se ajusta a estas condiciones es la parábola de eje vertical” (Cardenas Grisales, 2013).

### 3.3.2 Distancias de Visibilidad

Una de las características más importantes que deberá ofrecer el trazado de una carretera al conductor de un vehículo es la posibilidad de ver hacia delante, tal que le permita realizar una circulación segura y eficiente.



(Cardenas Grisales, 2013) define la distancia de visibilidad como “la longitud continua de carretera que es visible hacia delante por el conductor de un vehículo que circula por ella.”

Esta distancia de visibilidad deberá ser de suficiente longitud, tal que le permita a los conductores desarrollar la velocidad de diseño y a su vez controlar la velocidad de operación de sus vehículos ante la realización de ciertas maniobras en la carretera, como lo pueden ser por la presencia de un obstáculo fijo sobre su carril de circulación (distancia de visibilidad de parada), o el adelantamiento de un vehículo lento en carreteras de dos carriles dos sentidos (distancia de visibilidad de adelantamiento), o el encuentro de dos vehículos que circulan por el mismo carril en sentidos opuestos en carreteras terciarias de calzadas angostas (distancia de visibilidad de encuentro).

### **Distancia de visibilidad de parada**

“Se considera como distancia de visibilidad de parada de un determinado punto de una carretera, la distancia necesaria para que el conductor de un vehículo, que circula a la velocidad específica del elemento al cual se le quiere verificar esta distancia, pueda detenerlo antes de llegar a un obstáculo fijo que aparezca en su trayectoria.” (Cardenas Grisales, 2013)

Entonces, la longitud requerida de parada para detener el vehículo en las anteriores condiciones será la suma de dos distancias: la distancia recorrida durante el tiempo de percepción-reacción y la distancia recorrida durante el frenado.

### **Distancia de visibilidad de adelantamiento**

“Un tramo de carretera de dos carriles y de circulación en dos sentidos, tiene distancia de visibilidad de adelantamiento, cuando la distancia de visibilidad en ese tramo es suficiente



para que, en condiciones de seguridad, el conductor de un vehículo pueda adelantar a otro, que circula por el mismo carril, a una velocidad menor, sin peligro de interferir con un tercer vehículo que venga en sentido contrario y se haga visible en el momento de iniciarse la maniobra de adelantamiento.” (Cardenas Grisales, 2013)

Esta sería igual a la sumatoria de las siguientes distancias:

$D_1$  = Distancia recorrida durante el tiempo de percepción-reacción del conductor que va a efectuar la maniobra (m).

$D_2$  = Distancia recorrida por el vehículo adelantante durante el tiempo desde que invade el carril del sentido contrario hasta que regresa a su carril (m).

$D_3$  = Distancia de seguridad, una vez terminada la maniobra, entre el vehículo adelantante y el vehículo que viene en la dirección opuesta, recorrida durante el tiempo de despeje (m).

$D_4$  = Distancia recorrida por el vehículo que viene en sentido opuesto, estimada en  $2/3$  de  $D_2$  (m).

### **Distancia de visibilidad de encuentro**

“En carreteras terciarias de una calzada y sin diferenciación de carriles, la distancia de visibilidad de encuentro  $D_e$  es la longitud mínima disponible de carretera, visible para los conductores que circulan en sentidos opuestos, obligados a llevar a cabo maniobras para esquivarse” (Cardenas Grisales, 2013).

### **3.3.3 Diseño vertical Sustentable**

El Diseño vertical se resume en las tangentes verticales que definen las pendientes y las curvas verticales que son las que empalman dichas tangentes. Analizando las curvas



verticales se determinó que existe una influencia directa a la comodidad y seguridad si bien por un lado las curvas verticales en columpio rara vez generan riesgo, excepto cuando están continuas a una curva horizontal, en el caso de las curvas verticales en cresta se generan problemas con la distancia de visibilidad que estas generan, entonces desde el diseño geométrico se debe buscar minimizar las curvas en cresta por el riesgo que generan las mismas o buscar controlar de alguna manera el rebasamiento en las mismas y más aún cuando la vía tiene un carril por sentido.

Por otra parte, las pendientes altas constantemente se relacionan con a los accidentes de tránsito. Como evidencia (Mendoza Diaz, 2002) que la frecuencia y la severidad de los accidentes aumentan paralelamente con la pendiente en los dos sentidos de la pendiente tanto en el sentido ascendente como en el descendente. De la misma manera se ha encontrado que el sentido descendente es más problemático con respecto a los accidentes de tránsito, debido principalmente a los accidentes de camiones de carga, aunque se reconoce que el comportamiento y capacidad de frenado de estos últimos han mejorado con la salida de nuevos modelos en los últimos años. Concluye que las pendientes pronunciadas de más de 6% se asocian a una mayor presencia de accidentes. A su vez la pendiente condicionara las velocidades que se van a poder realizar a lo largo del trayecto, el esfuerzo que deberán de hacer los automóviles, el tiempo de viaje y por ende el consumo de combustible fósil, que se deriva en más dinero y más contaminación causada por la emisión de gases de efecto invernadero.

### **3.4 Diseño Geométrico Transversal**

“El diseño geométrico transversal de una carretera consiste en la definición de la ubicación y dimensiones de los elementos que forman la carretera, y su relación con el terreno natural, en cada punto de ella sobre una sección normal al alineamiento horizontal.” (Cardenas Grisales, 2013)

En esta etapa del diseño geométrico de carreteras se fija la rasante previamente revisada en el diseño geométrico vertical y a su vez se define el ancho de la faja que ocupará la futura carretera para de esta manera poder estimar las áreas y volúmenes de tierra para corte y relleno dentro del proyecto.

### 3.4.1 Secciones transversales.

“La sección transversal de una vía es el perfil del terreno en dirección normal al eje de la carretera” (Choconta Rojas, 2004).

El tipo sección transversal dependerá de la topografía natural del terreno y por comodidad se suele mantener predominante una sección transversal determinada a lo largo de un tramo. A continuación en la ilustración 16 se muestra los tipos de secciones según el corte y relleno que tengan.

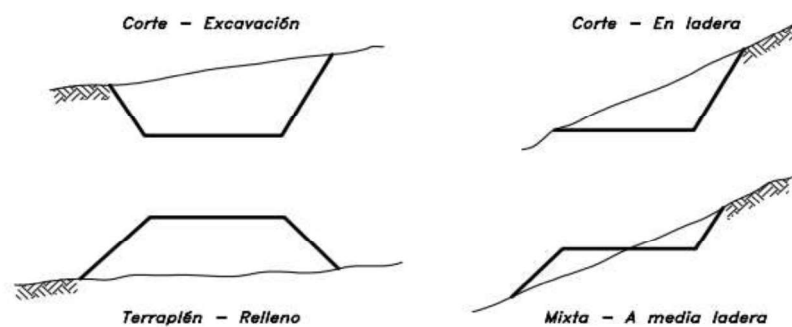


Ilustración 16: Secciones Transversales según el corte y relleno.

Fuente: (Cárdenas Grisales, 2013).

La tipología de sección transversal según su corte o relleno es un factor que altera de manera directa a la sustentabilidad dado que de la sección transversal se determina el volumen de corte y relleno que se tendrá en el proyecto y como se mencionó con anterioridad se debe buscar un equilibrio en el movimiento de tierras para que el proyecto tenga un equilibrio entre los componentes de la sustentabilidad.



### **3.4.2 Número y ancho de carriles.**

Un carril es la franja longitudinal que es parte de la calzada y que está construida para ser utilizada por una sola fila de vehículos. Cada carril tendrá un ancho suficiente para permitir la circulación de una sola fila de vehículos y puede variar en caso de tratarse de un carril especial, como puede ser uno destinado para el transporte público. El ancho y el número de carriles de la calzada será previamente definido con base en un análisis de capacidad y el nivel de servicio deseado al final del período de diseño.

El número y ancho de carriles afectara de manera directa la longitud de la calzada y por ende la longitud de la sección transversal es por esto que se relaciona de manera directa con el volumen de movimiento de tierras y la sustentabilidad que afecta la misma, además de relacionarse con el nivel de servicio, comodidad y la seguridad que se debe buscar en los proyectos carreteros, por la importancia de estos es imprescindible que exista un correcto análisis de la capacidad y del nivel de servicio que se requiere.

Cuando se realizan las secciones transversales del proyecto se deben de insertar proyectando de tal manera que los volúmenes de tierra sean similares entre corte y relleno.

### **3.4.3 Volumen de tierra y Diagrama de Masas.**

Los volúmenes de Tierra hacen referencia a la unidad cubica de corte y relleno que se calculan dentro de la misma, una vez definidas las secciones transversales se puede proceder a calcular los volúmenes totales. En la actualidad se facilita este proceso gracias a los programas de modelamiento 3D en donde el programa determina volúmenes más cercanos al real en función del nivel de detalle que tenga el levantamiento topográfico del proyecto.

## Diagrama de Masas

“El diagrama de masas es la representación gráfica del volumen de tierra a mover y de las distancias que hay que transportarlo en un tramo determinado de la carretera en construcción” (Cárdenas Grisales, 2013). A continuación, en la ilustración 17 se presenta una ejemplificación del mismo.

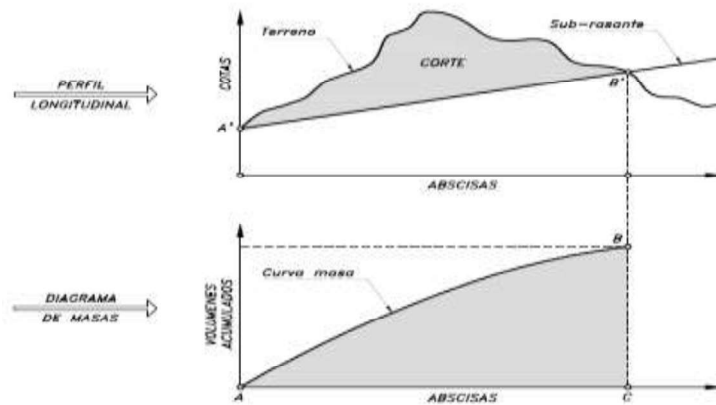


Ilustración 17. Diagrama de Masas.

Fuente: (Cárdenas Grisales, 2013)

El análisis del diagrama de masas es una actividad de suma importancia dentro del diseño geométrico de carreteras, puesto que este es el que genera mayor impacto a los componentes de la sustentabilidad, es por esto que se debe de tratar de lograr que los volúmenes de corte y relleno sean similares con una delantera mínima del corte, ya que parte de los volúmenes de corte no sirven en el proyecto, aunque se busque mejorarlos como es el caso de la capa vegetal. Es por esto que debe existir un estudio previo por el geólogo donde se defina un porcentaje aproximado de los volúmenes de tierra de corte que pueden ser usados dentro del mismo proyecto o mejorados para el mismo fin.

Además, se debe de ser analizada la distancia de transporte de material en caso de que vayan a ser reutilizados puesto que al superar cierta magnitud de transporte para los



rellenos el traslado puede superar los costos que se tendrían si solo se bota el material cortado.

Entonces lo óptimo sería generar secciones transversales en donde el corte y relleno sea similar a lo largo de toda la carretera para que de esta manera no exista la problemática de costos del transporte del material.



#### **4 CAPITULO CUARTO. SEGURIDAD EN EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS Y SU RELACIÓN CON LA SUSTENTABILIDAD.**

Las carreteras cumplen un papel primordial al momento de la interacción entre comunidades, ya que mediante ellas se logra una adecuada comunicación y movilidad, permitiendo el desarrollo y mejorando la economía de los sectores involucrados. Una correcta planificación y un adecuado diseño geométrico de redes de carreteras contribuye a generar proyectos sustentables, que permitan solucionar problemas actuales y futuros, alcanzando mayor efectividad al momento de que la carretera entre en operación.

Además, se debe tomar en cuenta la importancia de una correcta señalización, ya que una carretera sin la señalización adecuada puede generar conflictos que evidencien la ineficiencia vial. Por ello, la aplicación correcta de las señalizaciones, normas y reglamentos de tráfico ayudarán una eficaz funcionalidad de la vía, así como una factible interacción del conductor con el espacio en el que transita.

La correcta colocación de las señales verticales y horizontales ayudarán a captar la información plasmada sin tener que retirar la visión del proyecto carretero, estas tienen como principal objetivo guiar y regular para lograr que el flujo de tráfico sea funcional, seguro, fluido, ordenado y cómodo, de esta forma no solo buscará garantizar la seguridad para los conductores, además aportará como medidas regulatorias para el flujo de los usuarios de la carretera.

La mayoría de la señalización, normalmente va colocada a la intemperie, por lo que será necesario contar con una fabricación de gran calidad y con los materiales adecuados para garantizar su durabilidad y así poder tener una correcta visualización. Es de vital importancia que las señalizaciones cumplan con diferentes aspectos que permitan captar



de forma correcta sus indicaciones, generando así un cumplimiento integral y sustentable en la movilidad, anotamos algunas características principales:

- Brindar el tiempo y distancia necesaria para la reacción de los conductores.
- Su tamaño y la información que brinden deben tener coherencia con la situación que se efectuará, logrando así ser creíbles y acatadas por los conductores.
- Su visibilidad debe ser constante y que se aprecie tanto en la noche como en el día y en sectores de visibilidad limitada.
- Tienen que ser visibles, llamar la atención, ser legible y fácil de entender.

#### **4.1 Señalización horizontal**

La señalización horizontal también conocidas como DEMARCACIONES corresponde a la aplicación de marcas viales como: líneas, símbolos, letras, gráficos, flechas, entre otros. Estas son aplicadas sobre la calzada, bordillos y otras estructuras de las vías de circulación con el fin de regular el tráfico, dirigir u orientar a conductores o peatones y avistar la presencia de obstáculos. Además, son muy usadas para complementar la información que proveen otros dispositivos de control de tránsito como: semáforos y otras señalizaciones.

Este tipo de señalización es muy importante al momento de complementar un diseño geométrico, ya que contempla un beneficio directo para los usuarios al transitar por el proyecto carretero, en la medida que trasmite un mensaje al conductor sin que éste desvíe la mirada de su ruta. Una correcta señalización puntualiza en dar seguridad y agilizar el tránsito tanto en sectores de conflicto como en lugares de libre circulación, promoviendo de esta manera un proyecto funcional y sustentable. Las señalizaciones deberán ser normadas y cumplir con ciertas condiciones que permitan una correcta interacción del conductor con el proyecto carretero.



A medida que aumenta la necesidad del tráfico vehicular, también incrementa la necesidad de desarrollar proyectos carreteros con componentes y estándares geométricos elevados, en base a estos estándares se busca la ejecución de diseños sustentables que permitan la circulación vehicular actual y futura, sin afectar el nivel de servicio ni la velocidad de diseño del proyecto.

Para la correcta colocación de las demarcaciones se deberá revisar el diseño horizontal y vertical con el fin de identificar zonas donde pueden generarse conflictos de diferente naturaleza, según la tipología del problema se deberá escoger la señalización adecuada para la implementación, logrando de esta forma la obtención de un diseño geométrico sustentable, teniendo como prioridad aumentar la seguridad y la eficiencia para los usuarios.

## **4.2 Señalización Vertical**

Las señales verticales son objetos, estructuras o superficies en forma de placas colocadas en la carretera o continua a ella. Cumplen las funciones de informar a los conductores sobre la aproximación de peligros, regular de forma especial, permanente o temporal las rutas, direcciones o destinos y, guiar la movilización de los usuarios por las carreteras.

La colocación acertada de las señalizaciones ayuda a obtener una movilización segura, rápida y ordenada, que integrado con un correcto diseño geométrico se promoverá un proyecto carretero sustentable en condiciones óptimas para soportar el tráfico actual y un tráfico proyectado sin afectar el nivel de servicio.

### **4.2.1 Señales reglamentarias.**

Tienen como objetivo indicar con antelación a los conductores acerca de las características de la carretera en la medida de facilitar la movilización, cumpliendo con las normativas vigentes, las contravenciones, obligaciones, restricciones y autorizaciones.



El quebrantamiento de este tipo de señales es sancionado según la entidad reguladora. Además, se las evidencia por su fondo blanco y rojo, con letras y números de color negro.

#### **4.2.2 Señales preventivas**

Como su nombre indica, tiene como fin advertir a los usuarios de la vía sobre la existencia de riesgos y su tipología en zonas adyacentes ya sea de forma temporal o permanente. Por lo general, este tipo de señales ayuda a las personas a tomar precauciones como reducir la velocidad, la realización de alguna maniobra para seguridad del conductor y los demás vehículos. Los colores usados para denotar estas señales son amarillo en su fondo y negro para sus letras o figuras.

#### **4.2.3 Señales informativas**

Tiene como propósito proporcionar datos orientativos a los usuarios de las vías, entregando información útil para ubicarse y llegar a diversos destinos de forma simple y segura. Sus colores para denotar son azules para su fondo y blanco para todo tipo de descripción. En particular informan lo siguiente:

- Información del destino de la vía con sus carriles apropiados
- Distancia a la que se encuentra un determinado destino
- Inicio de salida a otras vías
- Lugares de atractivo turístico
- Servicios generales
- Nombres de ciudades, puentes, ríos, parques, entre otros
- Referencias de localización
- Cualquier otro dato de importancia para los usuarios.

### 4.3 Infraestructura de seguridad.

La poca importancia sobre el tema de seguridad vial se ha convertido en un problema social y de desarrollo, provocando un sin número de pérdidas no solo materiales y económicas, también pérdidas de vidas y fracturas permanentes.

Tal motivo ha generado la necesidad de crear políticas que regulen los proyectos viales existentes y por construirse, para que exista una planificación adecuada y dotada para que los usuarios puedan transitar de manera inclusiva respetando a los más vulnerables.

Para aumentar la seguridad y eficiencia de un proyecto carretero se ve la necesidad de incrementar el uso de infraestructuras de seguridad, estos son elementos que forman parte de un diseño geométrico sustentable, complementando el diseño final logrando disminuir la gravedad y cantidad de accidentes de tránsito.

#### Tachas Reflectivas



*Ilustración 18: Tachas reflectivas.*

*Fuente: (INEN, 2009)*

Las tachas reflectivas son dispositivos viales colocados en el asfalto para notificar efectivamente al conductor acerca de la delineación que existe dentro de una vía.

Las tachas están construidas a base de moldes inyectables con polímeros de alto impacto.

En condiciones nocturnas o de baja luminosidad, los beneficios de las tachas son aprovechados al máximo debido a la avanzada ingeniería óptica que ofrece, su retroreflectividad y durabilidad.



*Ilustración 19: Tachas reflectivas.*

*Fuente: (INEN, 2009)*

### **Tachas Bidireccionales**

Al ser dispositivos versátiles y multiusos, los tachones bidireccionales no solo cumplen la función de demarcación vial, sino también funcionan efectivamente como reductores de velocidad en el pavimento para prevenir accidentes. A diferencia de las tachas, los tachones están contruidos en concreto resinado, reforzados con fibra de vidrio y cuarzo para mayor resistencia, con una base rugosa que sirve para una mayor adherencia a la calzada.



*Ilustración 20: Tachones Bidireccionales.*

*Fuente: (INEN, 2009)*

Estas son las principales subcategorías que se encuentran en la señalización horizontal y es un aspecto fundamental para el bienestar del ciudadano. Mientras todos respetemos estas y todas las demás señales, disminuirémos el riesgo de accidentes.

## Estoperoles viales

Los estoperoles viales son elementos plásticos usados en las carreteras con el fin de avisar o prevenir sobre el ingreso a un lugar restringido, como reductor de velocidad y para dar mejor visualización a las demarcaciones sobre la vía.

Los ciclistas y peatones son los principales beneficiarios al momento de colocar estos elementos sobre los proyectos carreteros, ya que los vehículos se ven obligados a reducir la velocidad, aumentando el nivel de seguridad y reduciendo los accidentes de cualquier naturaleza.



*Ilustración 21. Estoperol vial.*

*Fuente: (García, 2009)*

## Sistema de contención tipo Barreras de Seguridad y Amortiguadores de impacto.

La función primordial de un amortiguador de impacto, es contrarrestar la detención brusca del vehículo en un choque que se genere de forma frontal en un punto duro, evitando el ingreso de algún elemento en el interior del vehículo.

Este sistema puede absorber impactos con velocidades hasta de 110km/h en distancias menores a 6 m, evitando la destrucción masiva del vehículo lo que resultaría ahorros en costos, mantenimiento y permitiría salvar vidas.

## Clasificación de amortiguadores de impacto.

- Amortiguadores de impacto sin capacidad de redireccionamiento.



*Ilustración 22: Amortiguador sin capacidad de redireccionamiento.*

*Fuente: (PROVIAS, 2018)*

- Amortiguadores de impacto con capacidad de redireccionamiento.



*Ilustración 23: Amortiguadores de redireccionamiento.*

*Fuente: (PROVIAS, 2018)*

- Amortiguadores de impacto móviles.



*Ilustración 24. Amortiguadores móviles.*

*Fuente: (PROVIAS, 2018)*

## Lecho de Frenado (Pista de Emergencia).

No se lo considera un elemento habitual en las carreteras, pero tiene gran importancia en aspectos de seguridad vial. Se puede describir a un lecho de frenado como un desvío lleno de material granular que cumple con la función de detener un vehículo que haya sufrido algún daño mecánico, especialmente el sistema de frenado en tramos de pendientes prolongadas.

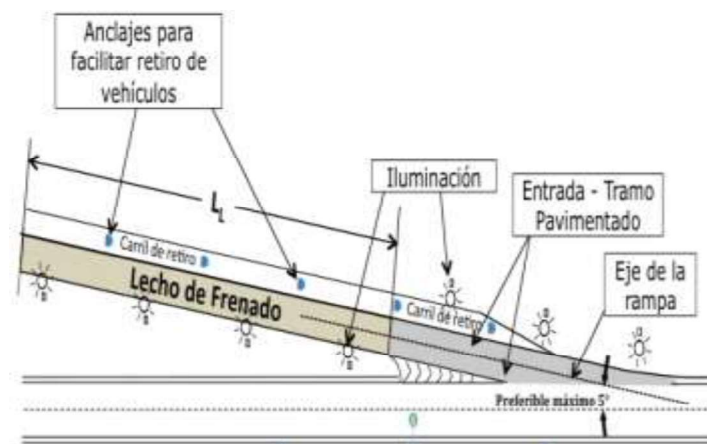


Ilustración 25. Lecho de frenado.

Fuente: (PROVIAS, 2018)

Las secciones con las que debe cumplir son de un ancho mínimo de 4.5 metros y debe contar con una profundidad de mínimo 50 cm con el fin de llenar de material granular que tengas dimensiones entre 5 y 10 mm.

No existe normativa sobre el material que debe ser ocupado como elemento de frenado, pero en base a los impactos ambientales y efecto que se causan sobre el mismo, se está procediendo a usar elementos reciclables, de tal forma se inició con ensayos con materiales como neumáticos usados, molidos adecuadamente.

La longitud deberá contar con un lecho de frenado que estará condicionado por la velocidad con la que le vehículo entre.



VELOCIDAD DE ENTRADA AL LECHO DE FRENADO (km/h)	LONGITUD (L) DEL LECHO DE FRENADO (m)
120	165
100	115
85	85
70	60
60	45
50	35

Tabla 6: Condiciones de lecho de frenado.

Fuente: (Gobierno de España. , 2016)

### **Efectividad de las Señalización Verticales y Horizontales.**

Según estudios estadísticos realizados por el Instituto Mexicano del Transporte el 40% de todos los accidentes de tránsito es en intersecciones, centros urbanos o poblado, desvíos laterales y autopistas son causados por la mala colocación de las señales de tránsito tanto verticales como horizontales, por tal motivo se ve recomendable que mediante estas señalizaciones se pueda realizar la separación de flujos de tránsito y reducir con ello estas áreas de conflictos, además ofrecer una buena visibilidad y patrones de conducción con preferencia (Sanchez, 2014).

La efectividad de las DEMARCACIONES han logrado evitar lesiones a peatones y ciclistas, ya que mediante una estimación estadística de accidentes en Noruega 1991-1992 muestra como el valor por kilómetro recorrido de accidentes de peatones en una vía sin señalización horizontal es de 4 a 6 veces mayor a la correspondiente a conductores o pasajeros de automóviles para luego varia a valores de 1 a 2 al momento de ser proyectos correctamente señalizados (Andrés Contreras, 2011).



## **5 CAPITULO QUINTO. ANÁLISIS CRÍTICO DE LAS ACCIONES DENTRO DE LAS FASES DEL DISEÑO GEOMETRICO VIAL DE CARRETERAS SUSTENTABLES.**

En el presente capítulo los autores plantean una serie de criterios para identificar la vinculación entre criterios y parámetros que permitan valorar la sustentabilidad que posee una carretera, los criterios y parámetros expuestos a continuación son de aplicación única para carreteras arteriales previamente definidas en el capítulo primero.

Para generar los criterios se realizó un análisis de la información recopilada en los anteriores capítulos de la presente investigación, en donde los autores conjuntamente con el tutor plantearon y reconocieron criterios que pueden ser definidos y regulados desde la etapa de diseño que fue el objetivo principal del presente trabajo de titulación. Desde un comienzo, dichos criterios se presentarán en función de la topografía del terreno natural previamente expuesto en la *Tabla 4* y su tipología para vías Arteriales descrita en la *Tabla 3*. Cabe recalcar que muy pocas vías pertenecerán a un solo tipo de relieve natural o a su vez a una sola clasificación de vía arterial ya que según se desarrollan las carreteras la topografía natural varía, como es el caso de las vías ecuatorianas que se caracterizan por tener fuertes variaciones en su tipología de carretera en distancias cortas, donde se transita de cotas superiores a 3800 msnm a cotas menores de 500 msnm en menos de 100 km, como es el caso de la vía que va del Parque Nacional Cajas, Cuenca, Azuay con 4200 msnm en las tres cruces y en solo 94 Km se llega a Naranjal, Guayas con una cota media de 750 msnm. Es por esto que sería imposible analizar bajo una misma clasificación a una carretera y por lo que los autores recomiendan analizar las carreteras por tramos según como cambie las condiciones de la vía para poder aplicar correctamente los criterios expuestos.



A continuación, la investigación presenta los criterios propios de los autores, que parten de un análisis crítico y detallado de la correlación entre los factores internos de Diseño Geométrico y los factores externos referentes al tipo de Terreno y jerarquía de la vía previamente definidos. Así la investigación pretende enfocar las vías arteriales.

### 5.1 Criterios

#### 5.1.1 Criterio 1: Radio Mínimo

Los autores condicionan el uso del radio mínimo en Diseño Geométrico, para considerar más sustentable una carretera, ya que como se expuso con anterioridad existe una relación directa entre los accidentes de tránsito y el radio mínimo, en la práctica los diseñadores en casos extremos se ven obligados a utilizar radios de curvatura por debajo de la normativa por condiciones externas diferentes, por lo que el porcentaje propuesto en la tabla considera también estos detalles. A continuación, se presenta una tabla donde los autores presentan porcentajes máximos recomendados del número de curvas con radio mínimo en relación al total de curvas existentes a lo largo de la carretera.

		PORCENTAJE DEL NUMERO DE CURVAS CON RADIO MINIMO		
		TERRENO NATURAL LLANO	TERRENO NATURAL ONDULADO	TERRENO NATURAL ACCIDENTADO
ARTERIAL PRINCIPAL	AUTOPISTA	10%	20%	30%
	ARTERIAL RURAL	10%	20%	30%
	ARTERIAL URBANA	15%	25%	40%
ARTERIAL MENOR	ARTERIAL MENOR RURAL	15%	25%	40%
	ARTERIAL MENOR URBANA	20%	30%	50%

Tabla 7. Porcentaje de curvas con Radios mínimos.

Fuente: Autores.



Los autores llegaron a restringir el radio mínimo dentro del diseño geométrico de carreteras puesto que existen estudios que evidencian la relación de accidentes con los radios de curvatura. Tal es el caso de “Algunas recomendaciones de seguridad para el proyecto geométrico de carreteras” realizado por (Mendoza Diaz) en donde se expone que en México;

“puede concluirse que en el 14.81% de los segmentos con R menor o igual a 400 m, ocurre 34.78% de los accidentes totales registrados. Por tanto, la ocurrencia relativa de accidentes en estos segmentos es tres veces mayor que en los segmentos con R mayor a 400” (Mendoza Diaz)

Una conclusión que surge del resultado anterior es que los radios mínimos para prácticamente todas las velocidades de proyecto, son generadores importantes de accidentes al generar una mayor fuerza centrífuga favoreciendo el volcamiento, además de reducir la distancia de visibilidad, razón por la que los autores también normaron como un criterio la distancia de visibilidad en las curvas.

De toda la información recaudada los autores propusieron el criterio expuesto con anterioridad en donde norman el uso del radio mínimo dentro de las carreteras de tal manera que se prioriza la seguridad de los usuarios así se tenga que generar una mayor inversión económica, la vida de los usuarios tiene mayor importancia al momento de generarse un proyecto carretero.

### **5.1.2 Criterio 2: Uso de la Pendiente Longitudinal Máxima.**

El uso de la pendiente longitudinal máxima es otro criterio que los autores proponen se debe controlar en la etapa del diseño geométrico de la carretera por su relación directa con la operación de la vía, y por ende los accidentes dados en las carreteras. A continuación, se presenta una tabla donde los autores presentan porcentajes máximos



recomendados de pendientes longitudinales máximas en relación al total de pendientes existentes en el diseño. Los autores aclaran que los tramos con pendientes máximas a su vez deben de tener una longitud crítica, (MTOPI, 2013) en la NEVI 12 anuncia que cuando las pendientes sean mayores al 10% la longitud no debe de superar los 180m.

		PORCENTAJE DEL NUMERO DE PENDIENTES MAXIMAS.		
		TERRENO NATURAL LLANO	TERRENO NATURAL ONDULADO	TERRENO NATURAL ACCIDENTADO
ARTERIAL PRINCIPAL	AUTOPISTA	10%	20%	30%
	ARTERIAL RURAL	10%	20%	30%
	ARTERIAL URBANA	15%	25%	40%
ARTERIAL MENOR	ARTERIAL MENOR RURAL	15%	25%	40%
	ARTERIAL MENOR URBANA	20%	30%	50%

Tabla 8. Porcentaje de pendientes longitudinales máximas.

Fuente: autores.

Los autores proponen regular el uso de la pendiente máxima por la relación directa que tiene esta con la facilidad operacional del usuario y consecuentemente con la frecuencia de accidentes. (Mendoza Diaz) en su publicación sugiere que “la frecuencia y la severidad de los accidentes aumentan con la pendiente, tanto en el sentido ascendente como en el descendente. Asimismo, ha encontrado que el sentido descendente es más problemático, debido principalmente a los accidentes de camiones de carga, aunque se reconoce que el comportamiento y capacidad de frenado de estos últimos han mejorado en los últimos años.”



Concluye que las pendientes de más de 6% se asocian a una mayor presencia de accidentes. De esto los autores dedujeron que, a mayor pendiente, mayor será la presencia de accidentes, es por eso que para el presente trabajo de titulación los autores propusieron condicionar el uso de la pendiente máxima ya que en nuestro medio es común ver vías trazadas en su totalidad con la pendiente máxima e incluso se llega a justificar en ciertos tramos el uso de una pendiente mayor a la máxima.

Los autores desde el punto de vista de la sustentabilidad buscan reducir los accidentes en las carreteras, facilitando la operación de las mismas con resoluciones técnicas eficientes, por lo que propone condicionar el uso de la pendiente máxima en función de la jerarquía vial que define el nivel de servicio requerido y la topografía natural del terreno que es el factor que los autores determinaron como el de mayor influencia en la toma de decisiones dentro del diseño geométrico, en donde los porcentajes expuestos varían según la facilidad de aplicar los mismo y según el criterio propio de los autores.

### **5.1.3 Criterio 3: Distancia de Visibilidad en Curvas.**

La distancia de visibilidad es otro de los factores que los autores del presente trabajo de titulación identificaron como un criterio de sustentabilidad por la relación directa que tiene con la operación y la accidentabilidad en las carreteras, si bien en las rectas representa un riesgo el no tener una distancia de visibilidad adecuada, los autores concluyeron que en las curvas representa un mayor riesgo y más aún en las curvas que son trazadas con el radio mínimo del diseño, es por esto que a continuación se anexa una tabla donde los autores recomiendan el porcentaje mínimo de la longitud total de la curva de radio mínimo que se debería de verse al momento que el conductor ingrese a la misma.



		PORCENTAJE MINIMO VISIBLE DE LA LONGITUD TOTAL DE LA CURVA		
		TERRENO NATURAL LLANO	TERRENO NATURAL ONDULADO	TERRENO NATURAL ACCIDENTADO
ARTERIAL PRINCIPAL	AUTOPISTA	70%	60%	50%
	ARTERIAL RURAL	70%	60%	50%
	ARTERIAL URBANA	60%	50%	40%
ARTERIAL MENOR	ARTERIAL MENOR RURAL	60%	50%	40%
	ARTERIAL MENOR URBANA	50%	40%	30%

Tabla 9. Porcentaje de longitud de visibilidad en curvas.

Fuente: Autores.

Estos porcentajes se consiguen con una correcta planificación desde el diseño mismo, se debe generar y respetar el derecho de vía hablando de carreteras arteriales especialmente, con el fin aumentar la distancia de visibilidad y a su vez eliminar la vegetación existente que obstaculice la visibilidad del conductor.

La distancia de visibilidad a lo largo de la curvatura es uno de los factores que maximiza la tasa de accidentabilidad en las mismas, tal como lo evidencia (Mendoza Diaz) en “Algunas recomendaciones de seguridad para el proyecto geométrico de carreteras” en donde después de exponer la tasa de accidentabilidad y concluir que existe relación entre menor radio-mayor tasa de accidentabilidad, define a la distancia de visibilidad como un factor que favorece los accidentes de tránsito, por lo que los autores concluyeron que este debe de ser normado. Este criterio en muchos de los casos puede cumplirse con facilidad y con tratamientos de bajo costo; como puede ser la eliminación de vegetación u otros obstáculos menores que se encuentren en el interior de las curvas horizontales.



#### 5.1.4 Criterio 4: Entre tangencias con distancia de visibilidad para adelantamiento.

Este es un criterio aplicable a las carreteras que tienen un carril por sentido, puesto que las de dos carriles o más por sentido tienen la ventaja de permitir rebasamientos a lo largo de la carretera, es por esto que las carreteras arteriales que por su clasificación tienen 2 o más carriles tendrán un porcentaje del 100%. Para el caso de vías arteriales con un carril por sentido se presentan los porcentajes propuestos por los autores de entretangencias o tramos rectos que permitan rebasar en relación del total.

		PORCENTAJE MÍNIMO DEL NÚMERO DE ENTRETANGENCIAS QUE PERMITAN EL REBASAMIENTO.		
		TERRENO NATURAL LLANO	TERRENO NATURAL ONDULADO	TERRENO NATURAL ACCIDENTADO
ARTERIAL PRINCIPAL	AUTOPISTA	100%	100%	100%
	ARTERIAL RURAL	100%	100%	100%
	ARTERIAL URBANA	100%	100%	100%
ARTERIAL MENOR	ARTERIAL MENOR RURAL	30%	25%	20%
	ARTERIAL MENOR URBANA	30%	25%	20%

Tabla 10. Porcentaje mínimo de entretangencias que permitan rebasar.

Fuente: Autores.

Los autores determinaron que tener restringido la oportunidad de rebasar en carreteras de un carril por sentido genera un aumento en la tasa de accidentes al momento de rebasar puesto que esta tipología de vías con un carril por sentido combinado con la presencia de vehículos pesados que al ir cargados se ven obligados a ir mucho más lento que la velocidad promedio, lo que generara un congestionamiento detrás de dicho vehículo y



una serie de accidentes por la necesidad de rebasar de todos los usuarios que estén en dicho congestionamiento sustancial.

Además, dentro de los capítulos anteriores se evidencio esta problemática, tal como (Mendoza Diaz) señala que; “alrededor de 10% de los accidentes carreteros con heridos se generaron en este tipo de operaciones” donde en carreteres de un carril por sentido con congestionamiento por vehículos lentos se generaron accidentes por el intento de rebase.

“En carreteras de un carril por sentido, el vehículo que rebasa debe superar al vehículo rebasado, ingresando al carril opuesto, así que, la oportunidad para rebasar requiere de un espacio suficientemente grande en el tránsito de frente para que la maniobra pueda realizarse, más la distancia recorrida por el vehículo que rebasa, más un margen de seguridad.” (Mendoza Diaz).

De la presente información los autores concluyeron que un criterio de sustentabilidad que sumará a la facilidad operacional de la carretera y por ende a la seguridad del usuario, será de generar entretangencias con distancia de visibilidad de adelantamiento.

Además, se encontró que una práctica común para mitigar los accidentes en los intentos de rebasamiento y que podría complementar este criterio es el uso, implementación de carriles de rebase especialmente en terrenos montañosos en donde es más difícil generar entretangencias con una distancia de visibilidad prudente.

(Mendoza Diaz) informa “existe una reducción de 35% en todos los accidentes al haber proporcionado este tipo de carriles en carreteras de Australia, así como de 25% en los accidentes con muertos y/o heridos. Se reporta una baja de 10 a 20% en los accidentes al instalarse carriles de rebase en pendientes ascendentes de 3 a 4%, así como una reducción de 20 a 40% en pendientes más pronunciadas.”



### 5.1.5 Criterio 5: Curvas verticales en cresta, convexas.

Las curvas verticales en cresta tienen una relación con la operación de la carretera, especialmente en lo referente, velocidad y accidentabilidad como se expuso en capítulos anteriores por lo que disminuye la visibilidad de los conductores considerándose un riesgo, es por esto que los autores proponen los siguientes porcentajes máximos de curvas verticales en cresta críticas en relación al total de curvas verticales analizadas en el diseño geométrico de carreteras. Los autores aclaran que las curvas en cresta que se analizan en este criterio son solo las críticas que los autores las definen como aquellas curvas en cresta que la diferencia de pendientes a empalmar es mayor o igual a 1.5 veces la pendiente máxima del diseño.

		PORCENTAJE MAXIMO DEL NUMERO DE CURVAS VERTICALES EN CRESTA CRITICAS.		
		TERRENO NATURAL LLANO	TERRENO NATURAL ONDULADO	TERRENO NATURAL ACCIDENTADO
ARTERIAL PRINCIPAL	AUTOPISTA	15%	30%	40%
	ARTERIAL RURAL	10%	20%	30%
	ARTERIAL URBANA	15%	25%	35%
ARTERIAL MENOR	ARTERIAL MENOR RURAL	20%	40 %	50%
	ARTERIAL MENOR URBANA	20%	30%	35%

Tabla 11. Porcentaje máximo del número de curvas verticales en cresta críticas.

Fuente: autores.

Los autores determinaron que las curvas en cresta son un criterio referente a la sustentabilidad, puesto que al generar una alteración directa al componente técnico y a la seguridad debe de ser mitigado de alguna manera. Dentro de la información encontrada para determinar que las curvas en crestas son contrarias al desarrollo de un proyecto



carretero sustentable resalta la investigación de (Mendoza Diaz), donde reporta que en México existen “frecuencias de accidentes 52% mayores en sitios con restricciones a la visibilidad debidas a la curvatura vertical, en relación con sitios de control” Por esto y a partir del juicio de los autores se generó el criterio expuesto con anterioridad, buscando limitar el uso de curvas en cresta críticas que se puede concluir que son las más peligrosas para los usuarios.

Además, se puede concluir y deducir que, al existir una curva en cresta más cerrada, menor será la distancia de visibilidad de los usuarios, es por esto que los autores definieron como críticas a aquellas que su sumatoria absoluta sea igual o mayor a 1.5 veces la pendiente máxima.

#### **5.1.6 Criterio 6: Relación Corte-Relleno.**

La relación corte relleno es un criterio de mucha importancia por la influencia que tiene en el componente económico de toda obra, si bien es cierto que mientras en terrenos planos va a sobresalir el relleno, en los terrenos muy accidentados será opuesto y será más fácil manejar secciones con mucho más corte que relleno. Los autores son conscientes de esto, no obstante, generaron relaciones de corte-relleno según la jerarquía y el terreno natural en el que se esté diseñando. A continuación, se expone las relaciones de corte-relleno que permitan recomendar una carretera como sustentable, pensando en la afectación que provoca el movimiento de tierras, según el caso correspondiente los autores indican que se puede variar hasta en un 5% las relaciones propuestas.



		RELACIONES PORCENTUALES CORTE-RELLENO PROPUESTAS.		
		TERRENO NATURAL LLANO	TERRENO NATURAL ONDULADO	TERRENO NATURAL ACCIDENTADO
ARTERIAL PRINCIPAL	AUTOPISTA	35-65	55-45	65-35
	ARTERIAL RURAL	37.5-62.5	60-40	62.5-37.5
	ARTERIAL URBANA	35-65	60-40	65-35
ARTERIAL MENOR	ARTERIAL MENOR RURAL	32.5-67.5	60-40	65-35
	ARTERIAL MENOR URBANA	30-70	60-40	65-35

Tabla 12. Relaciones porcentuales Corte-Relleno propuestas.

Fuente: Autores.

**NOTA:** AL TRATARSE DE VÍAS ARTERIALES SE CONSIDERAN QUE NO VA A VARIAR EL CORTE-RELLENO POR SER VÍAS URBANAS O RURALES.

La cantidad de volumen tanto en corte como relleno varían de acuerdo a la estabilidad de los terrenos y su topografía natural. En terrenos ondulados y montañosos, donde las condiciones de los suelos son un factor determinante, el movimiento y transporte de tierras es el rubro mayor consideración en la construcción. En caso de terrenos donde predominen los terraplenes el rubro de relleno será el mayor, debido a que aumentara el costo de transporte de material.

Lo más eficiente en la relacion corte y relleno es la reutilización del material obtenido en obra, eliminando el porcentaje de capa vegetal que no pueda ser estabilizado, se puede decir que para mejor manejo de los volúmenes es beneficioso tener un mayor porcentaje de corte.

Los autores proponen porcentajes mayores en volúmenes de corte tanto en terreno ondulado como en el accidentado tomando en cuenta los ángulos de reposo del material,



debido a que existirá una mejor planificación del proyecto carretero, caso contrario si existe algún tipo de relleno en estos proyectos se podría generar una inestabilidad de la masa en forma de deslizamientos, avalanchas y desprendimientos. En caso de terrenos llanos el volumen de relleno predominará debido a que las pendientes naturales son bajas y existirá la presencia de agua tanto superficial como subterránea que puede actuar como una sobrecarga en los estratos.

### 5.1.7 Criterio 7: Secciones recomendadas.

La sección es una de las partes más importantes dentro de un proyecto carretero, debido a que de ella dependerá que se opere con la velocidad de diseño e influya sobre nivel de servicio de la misma. Con el propósito de generar diseños sustentables y que vayan de la mano con el crecimiento vehicular, los autores proponen las siguientes secciones según la tipología vial.

		SECCIONES PROPUESTAS.		
		NUMERO DE CARRILES MINIMO	BERMA ESPALDON ONDULADO	O CUNETAS REVESTIDAS
ARTERIAL PRINCIPAL	AUTOPISTA	4	SI	SI
	ARTERIAL RURAL	4	NO	SI
	ARTERIAL URBANA	4	NO	NO (PARTE DE LA SECCION)
ARTERIAL MENOR	ARTERIAL MENOR RURAL	2	NO	SI
	ARTERIAL MENOR URBANA	2	NO	NO (PARTE DE LA SECCION)

Tabla 13. Secciones Propuestas.

Fuente: autores.

Los proyectos carreteros deben mantener un número constante de carriles en longitudes tan largas como sea posible, sin tomar en cuenta los carriles construidos como auxiliares



que son utilizados ocasionalmente. El número de carriles escogidos al inicio del proyecto serán denominados básicos, esto significa que no deben ser reducidos por demanda local, caso contrario si existe aumentos puntuales de la demanda se desarrollaran nuevos carriles denominados auxiliares.

En base a la normativa vigente los autores escogieron un valor mínimo de 2 carriles por sentido, debido a que dentro de la clasificación funcional por TPDA las carreteras arteriales están compuestas por 2 o más carriles garantizando un flujo completamente continuo ( Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. , 2018).

### 5.1.8 Criterio 8: Estructuras de seguridad y señaléticas en curvas.

Para priorizar la seguridad, guiar y evitar algún tipo de accidente entre los usuarios del proyecto carretero, se propone la utilización obligatoria de la doble línea continua amarilla complementada con flechas y tachas reflectivas. Estos elementos deberán ser ubicados con los siguientes criterios:

Lc: Longitud total de la curva.

		TIPO DE RELIEVE NATURAL DEL TERRENO		
		LLANO	ONDULADO	ACCIDENTADO
ARTERIAL	AUTOPISTA	$0.3Lc + Lc + 03Lc.$	$0.3Lc + Lc + 0.3Lc.$	$0.35Lc + Lc + 0.35Lc.$
PRINCIPAL	ARTERIAL RURAL	$0.2Lc + Lc + 0.2Lc.$	$0.25L + Lc + 0.25 Lc.$	$0.3L+Lc+0.3Lc.$
	ARTERIAL URBANA	No aplica.	No aplica.	No aplica.
ARTERIAL MENOR	ARTERIAL MENOR RURAL	$0.3Lc + Lc + 03Lc.$	$0.3Lc + Lc + 03Lc.$	$0.35Lc + Lc + 0.35Lc.$
	ARTERIAL MENOR URBANA	$0.25L + Lc + 0.25 Lc.$	$0.3Lc + Lc + 03Lc.$	$0.35Lc + Lc + 0.35Lc.$

Tabla 14. Longitud de colocación de señales de tránsito.

Fuente: Autores.



Para priorizar la seguridad en la circulación vehicular en curvas es necesario no sobrepasar ciertas velocidades, para ello el conductor debe valorar con anterioridad la situación evitando frenar bruscamente y poder controlar el vehículo.

En base a este criterio los autores han propuesto colocar señalizaciones de acuerdo a la longitud total de la curva sumándole un porcentaje adicional que dependerá únicamente de la longitud de la misma, esta distancia adicional además de advertir el inicio de la curva, servirá como distancia de frenado, permitiendo al conductor entrar cómodamente evitando cualquier colisión o pérdida de carril.

**5.1.9 Criterio 9: Estructuras de seguridad y señaléticas “Radares”.**

Muchos de los accidentes de tráfico son causados por las elevadas velocidades, dejando como resultado muchos daños económicos y pérdidas de vida. Por esto los autores con el objetivo de prevenir y circular de forma más segura proponen la colocación de radares que sirvan como reguladores de límites de velocidades con el propósito de disminuir el número de accidentes y muertes en las carreteras.

En la siguiente tabla se presentará el número de radares que se propone colocar en una longitud vial de 40km.

	TIPO DE RELIEVE NATURAL DEL TERRENO		
	LLANO	ONDULADO	ACCIDENTADO
Cada 40 km de carretera.	4 radares	3 radares	3 radares

Tabla 15. Cantidad de Radares.

Fuente: Autores.

La colocación de radares para poder controlar los excesos de velocidad se encuentra utilizados a nivel mundial, su implementación tiene como objetivo evitar o reducir los accidentes de tránsito y a su vez la tasa de mortalidad por esta causa.



Según el Club Europeo de Automóviles “La velocidad es uno de los principales motivos de fallecimiento en las vías y la instalación de radares mejorará la seguridad vial y, en definitiva, reducirá las muertes en las carreteras” (Sailema., 2017).

Mediante un estudio realizado en España se puede decir que el 28% de los accidentes en las carreteras son producidos por exceso de velocidad y para poder controlar esto se desarrolló un mapa de radares, dando como resultado una gestión eficaz y conductores más responsables. Luego de la colocación de radares en un área determinada se pudo reducir hasta es un 6% los accidentes por esta causa (Sailema., 2017).

En base a esto los autores proponen la colocación de 3 radares como número mínimo en una longitud de 40Km con el objetivo de adaptar a los usuarios de los proyectos carreteros a este tipo de tecnología y de esta forma generar nuestro propio mapa de radares con la finalidad de reducir el porcentaje de accidentabilidad por esta causa.



## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 CONCLUSIONES.

- Dentro del presente análisis se establece que en la Etapa de Diseño Geométrico es posible enfrentar el proceso con directrices de partida que permiten mejorar la seguridad vial.
- Los valores expuestos en las tablas de criterios, parten de un análisis propio de los autores, dichos criterios que deben considerarse en el diseño significan un aporte que servirá de punto de partida para la toma de decisiones y análisis de las alternativas planteadas.
- Los criterios expuestos serán el punto de partida para revisión de proyectos en donde se valide la información indicada y se articule con datos de accidentalidad, con la finalidad de ir ajustando y generar fórmulas que permitan cuantificar con datos estadísticos y numéricos.
- Los criterios son aplicables a la fase de diseño, pero la articulación en las etapas contractuales será lo más importante para fortalecer y lograr proyectos innovadores y sustentables.
- Dentro del análisis de los factores externos del diseño geométrico de carreteras, los autores determinaron que el factor más influyente al momento de generar criterios de sustentabilidad es la topografía natural del terreno pues condiciona de manera directa a las condiciones de operación de la vía que se puede generar en un proyecto con un presupuesto establecido.
- Al generar los criterios de sustentabilidad los autores determinaron que desde el diseño geométrico se puede aportar principalmente al componente técnico y a la seguridad.



## 6.2 RECOMENDACIONES

- Evaluar constantemente la seguridad de las carreteras, en donde se debe mantener una señalización clara y precisa, además se debe verificar que la estructura física este en óptimas condiciones.
- Se debe considerar la utilización de parámetros de sustentabilidad para el diseño geométrico de carreteras, lo que permitirá aportar con los objetivos de desarrollo sustentable planteado en la Agenda 2030 de la ONU.
- Los parámetros de diseño geométrico deben analizarse y estudiarse en la fase de Prefactibilidad y Factibilidad poniendo énfasis en las pendientes y tipo del terreno, la velocidad y los radios de curvatura.
- Los criterios expuestos en el presente trabajo de titulación fueron producto del análisis crítico de los autores relacionando los conceptos de sustentabilidad con el diseño geométrico de carreteras, los autores creen necesario el análisis individual de cada criterio expuesto, de tal manera que se puedan generar Proyectos carreteros que minimicen el riesgo de accidentes y mejoren la seguridad vial.



## BIBLIOGRAFIA

- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. . (2018). Manual de Señalización de tránsito. *Manual*.
- Andrés Contreras, A. M. (2011). Eficacia y/o efectividad de medidas de seguridad vial utilizadas en diferentes países. . *IMT - Instituto Mexicano del Transporte*.
- Bermejo, R. (2016). Del Desarrollo Sostenible según Brundtlannt a la Sostenibilidad como Biomimesis. *HEGOA*.
- Cáceres, J. F. (2015). Señales Horizontales. *AUTOESCUELA*.
- CEPAL. (2016). La Agenda 2030 y sus objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe. . .
- ERF. (2009). *Sustainable roads and optimal mobility*. ERF.
- European Union Road Federation. (2009). Sustainable roads and optimal mobility.
- García, A. G. (2009). AUTOVIA. *WIKIVIA*.
- Giordani, C. (2016). PAVIMENTOS . *Departamento de Ingeniería Civil* .
- Gobierno de España. . (2016). Instrucción de Carreteras, Norma 3.1 - IC. *Instrucción de Carreteras* .
- Greenroads. (2011). *Greenroads*. Greenroads.
- INEN. (2009). *Pintura para Señalamiento de Tráfico* . Quito: INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN .
- Maldonado., I. C. (2019). Factores internos y externos que afectan el nivel de servicio de una vía. .



Mendoza Diaz, A. (s.f.). *Algunas recomendaciones de seguridad para el proyecto geometrico de carreteras.*

Mescua, L. T. (2018). *Afirmado de Carretera.*

MTOP. (2012). *Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12.* Quito: Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

PROVIAS. (2018). *Vias de Transito y Movilidad mas Segura.* . Quito: PROVIAS Nacional. .

Sailema., O. D. (2017). EL PROCESO DE HOMOGOLACIÓN Y CALIBRACION DE DISPOSITIVOS Y EQUIPOS TECNOLOGICOS FOTORADAR Y LA NOTIFICACION DE LAS INFRACCIONES DE TRANSITO. *UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO .*

Sanchez, J. F. (2014). *CRITERIOS DE SUSTENTABILIDAD PARA CARRETERAS EN MEXICO.* Mexico: INTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE.

Moreno Álvarez, J. P. (2018). *Estudio comparativo de sostenibilidad en carreteras mexicanas.*

Plan estratégico de movilidad, Ministerio de Transporte y Obras Publicas (2016).

Rojas, C. (2003). El Desarrollo Sustentable: Nuevo Paradigma Para La Administración Pública. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.

## AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotros, **Jean Pierre Balarezo Apolinario** y **Andres Gonzalo Ávila Ortiz** portadores de las cédulas de ciudadanía N.º 0706271285 y 0107082877. En calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“Análisis Crítico de Sustentabilidad en el Diseño de Carreteras”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, **13 de octubre de 2021**

F:   
Jean Pierre Balarezo Apolinario.  
0706271285

F:   
Andres Gonzalo Ávila Ortiz.  
0107082877