



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

**ACTUALIZACIÓN DE DATOS VIALES EN LA RUTA
QUETZALCÓATL (RECTA A CHOLULA), PARA
INGENIERÍA DE PAVIMENTOS.**

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Con opción terminal en Tránsito y Transporte

Presenta:

ING. OSCAR OSORIO NUÑEZ

Director de Tesis:

M.I. JOSÉ LUIS STEFANONI MINUTTI

Puebla, Pue.

Octubre 2023



Oficio No: SIEP/199/2023

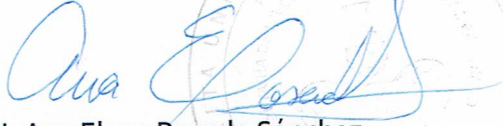
Mtro. Alfredo Avendaño Arenaza
Director General de Bibliotecas
Presente

Por este medio me dirijo a usted para informarle que la tesis con título "**Actualización de datos viales en la Ruta Quetzalcoatl (Recta a Cholula), para ingeniería de pavimentos**" ha sido avalada bajo los preceptos de integridad académica; por tanto, se autoriza la impresión de tesis del alumno:

Nombre del alumno: Oscar Osorio Núñez
Matrícula: 221470174
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería con Opción Terminal en Tránsito y Transporte

Sin más por el momento, agradezco la atención al presente.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Z., a 06 de octubre de 2023


M. I. Ana Elena Posada Sánchez
Secretaria de Investigación y Estudios
de Posgrado


M.I. José Luis Stefanoni Minutti
Director de tesis



BUAP

Oficio No. SIEP/0089/2023

C. Oscar Osorio Núñez

Matrícula 221470174

Pasante de la Maestría en Ingeniería

con opción terminal en Tránsito y Transporte

Facultad de Ingeniería, BUAP.

Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema titulado: **Actualización de datos viales en la ruta Quetzalcóatl (recta a Cholula) para ingeniería de pavimentos**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Tránsito y Transporte. Asignándose como Director de tesis al M.I. José Luis Stefanoni Minutti y Codirector al M.I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente

“Pensar bien, para vivir mejor”

H. Puebla de Zaragoza, enero 20 de 2023.

M.I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



C.c.p. M.I. José Luis Stefanoni Minutti y M.I. Carlos Adolfo Coria Gutiérrez, Director y Codirector del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

AEPS/JLSM/sco*

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a Isis Armilevy y a mi familia, que formaron parte de esta nueva etapa mostrándome su apoyo incondicional y siempre alentándome a seguir alcanzando nuevos objetivos.

AGRADECIMIENTOS

Con gran satisfacción, agradezco a todas las personas que me ayudaron, orientaron y aportaron para la realización de este trabajo. De manera especial:

Al M.I. José Luis Stefanoni Minutti asesor de este trabajo, que de manera directa contribuyo con su conocimiento y experiencia profesional.

A la empresa LABORATORIO DE INGENIERIA S.A DE C.V., que tuvo a bien proporcionarme los datos del Proyecto Quetzalcóatl, el cual forma parte de las bases para el desarrollo de esta tesis.

Índice

INTRODUCCIÓN	i
Antecedentes	iii
Planteamiento del problema.	iv
OBJETIVO	v
Objetivos específicos	v
Justificación	v
Hipótesis	vi
CAPÍTULO I INGENIERIA DE TRANSITO	1
1.1 Clasificación de las redes viales	1
1.1.1 Clasificación funcional	1
1.1.2 Sistema vial urbano	2
1.2 Clasificación por sistema de carreteras	4
1.2.1 Clasificación de transitabilidad	4
1.2.3 Clasificación por jurisdicción federal	5
1.3 Clasificación vehicular en México.	5
1.3.1 Clasificación atendiendo su clase	6
1.3.2 Clasificación por nomenclatura, numero de ejes y llantas.	7
1.4 Aforos vehiculares	9
1.4.1 Métodos de aforo	9
1.5 Volúmenes de tránsito	10
1.5.1 Conceptos	11
1.5.2 Volúmenes de tránsito totales.	12
1.5.3 Volúmenes de tránsito promedios diarios	13
1.5.4 Volúmenes de tránsito horarios	14
1.6 Volúmenes de tránsito futuro	15
1.6.1 Relación entre los volúmenes de tránsito promedio diario, anual y semanal	15
1.6.2 Pronóstico del volumen de tránsito futuro	18
1.6.3 Regresiones matemáticas para el cálculo de volúmenes de tránsito futuro	19
2.1 Estructura del pavimento	21

2.1.1 Terraplén	21
2.1.2 Subyacente	21
2.1.3 Subrasante	23
2.1.4 Subbase hidráulica	24
2.2 Mezclas asfálticas para carreteras.....	32
2.2.1 Mezcla asfáltica de granulometría densa	33
2.2.2 Mezcla asfáltica de granulometría abierta.....	33
2.2.3 Mezcla asfáltica de granulometría discontinua, tipo SMA.....	34
2.3 Pruebas de calidad de los materiales	34
2.3.1 Granulometría de materiales	34
2.3.2 Partículas alargadas y lajeadas.....	35
2.3.3 Equivalente de arena.....	36
2.3.5 Desgaste de los Ángeles	36
2.3.6 Valor de Soporte de California (CBR)	37
2.3.7 Grado de compactación	38
2.3.8 Compactación AASTHO	38
2.4 Materiales pétreos para mezclas asfálticas	38
2.4.1 Densidades relativas y absorción de materiales pétreos	41
2.4.2 Intemperismo acelerado de materiales pétreos.	43
2.4.3 Desprendimiento por fricción en materiales pétreos para mezclas asfálticas.	44
2.4.4 Partículas trituradas de materiales pétreos para mezclas asfálticas	44
2.4.5 Azul de metileno de materiales pétreos para mezclas asfálticas	45
2.4.6 Pulimento acelerado.....	45
2.5 Ejes equivalentes	45
2.6 Coeficiente de daño	46
2.7 Factores direccionales y por carril	48
2.8 Equivalent Single Axle Load (ESAL´s).....	50
2.8.1 Cálculo de Equivalent Single Axle Load (ESAL´s)	50
CAPITULO III ACTIALIZACIÓN DE DATOS VIALES	52
3.1 Datos del Proyecto Quetzalcóatl	52
3.2 Análisis de los resultados del Proyecto Quetzalcóatl	59
3.3 ACTUALIZACIÓN DE DATOS VIALES	60
3.3.1 Ajuste del tránsito diario	60
3.3.2 Ajuste de tránsito promedio diario anual	64

3.3.3 Ajuste de volúmenes futuros	68
3.3.4 Determinación de la tasa de crecimiento	76
CAPITULO IV APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS A LA INGENIERIA DE PAVIMENTOS	78
4.1 Configuración vehicular y datos de proyección de tránsito.	78
4.2 Cálculo de ejes equivalentes	80
4.3 Comparación de ejes equivalentes	86
Conclusiones	90
Bibliografía	91

INTRODUCCIÓN

La infraestructura vial forma parte de los patrimonios más importantes de una región, estado o país. Por ello es de gran importancia mantenerla en buen estado y nivel de servicio, ya que de esta manera se garantiza el desarrollo social y económico.

Con el paso de los años y el crecimiento del parque vehicular cobran mayor relevancia los estudios de planeación y mejora de los proyectos carreteros, es ahí donde la Ingeniería de Tránsito, una rama de la ingeniería civil, es la indicada para tratar estos aspectos.

Continuando con la idea de la importancia de la Ingeniería de Tránsito en la planeación de proyectos de mantenimiento y construcción de la infraestructura vial se presenta este trabajo de investigación, el cual está dirigido a la actualización de los Datos Viales utilizados en el Proyecto Quetzalcóatl, elaborado por la empresa GEODINFRA S.A.DE C.V, con la propuesta del diseño de pavimento para la Vía Quetzalcóatl (Recta a Cholula).

Esta es una vialidad de gran importancia para el estado de Puebla, ya que por ella se conectan los municipios de la Heroica Ciudad de Puebla con San Andrés Cholula, por la cual se movilizan alrededor de 120,000 vehículos diarios actualmente, donde la mayoría de los usuarios la utilizan para llegar a sus trabajos, centros escolares y hogares.

En el Capítulo I, Ingeniería de Tránsito, se describe la clasificación de las vialidades en México por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT), además de dar explicación para la interpretación de los volúmenes vehiculares, y la metodología para el cálculo del tránsito futuro.

El Capítulo II, Ingeniería de Pavimentos, expone las características del pavimento, abarcando las capas estructurales y las características de los materiales con las que se construyen, así mismo presenta el proceso para el cálculo de los ejes equivalentes.

La Actualización de Datos Viales, punto abordados en el Capítulo III, es la descripción del procedimiento de la recolección de datos, el cálculo del volumen de tránsito y tasa de crecimiento para del Proyecto Quetzalcóatl, también se encuentra la propuesta metodológica para la estimación del tránsito vehicular cuando no es posible aforar un tramo de estudio durante una semana completa, como fue el caso del proyecto con el cual

se basa este trabajo, a su vez se encuentra el ajuste del tránsito promedio diario anual y la tasa de crecimiento.

Por último, el Capítulo IV, muestra el cálculo de los ejes equivalentes utilizando la tasa de crecimiento, el volumen y la configuración vehicular, del Proyecto Quetzalcóatl y los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo, para después realizar una comparación del resultado del número ejes equivalentes, esto con la finalidad de una interpretación más clara de los resultados.

Antecedentes

Hoy en día la Vía Quetzalcóatl (Recta a Cholula) es una de las principales vialidades interurbanas de la ciudad de Puebla que con el paso del tiempo ha sufrido de varias modificaciones.

Para 1974 se comienza con la construcción de lo que hoy conocemos como la RUTA QUETZALCOATL, en consecuencia, de la detonación del proceso de la planeación y la regulación del uso de suelo mediante promotores de vivienda oficiales, como Infonavit, lo que dio paso a la conurbación de San Pedro y San Andrés Cholula. (Miron, 2019)

Inaugurándola el en 1976 (Schumacher, 2016).

En la actualidad a este tramo se le han dado diversos tratamientos para brindar un mejor servicio a los usuarios de esta importante vía de comunicación. Se tiene registro que en el 2021 se realizó el mantenimiento más reciente.

Planteamiento del problema.

Dentro de los estudios que se realizan en el área de la ingeniería de tránsito tenemos los aforos vehiculares, los cuales aportan los datos necesarios para caracterizar una vialidad y proponer mejoras que sirvan para brindar un mejor servicio.

Estas mejoras pueden ser: optimar los niveles de servicio de las vialidades, la configuración de tiempos semafóricos, propuestas de mantenimiento operativo o de infraestructura, además de brindar la serie de datos fundamentales para la creación de nuevos proyectos carreteros.

Para este caso de estudio se evaluará el proceso de ejecución de aforos vehiculares para la propuesta del Proyecto Quetzalcóatl, en la Vía Quetzalcóatl (Recta a Cholula), el cual no se pudo realizar durante una semana completa, optando por efectuarlo por un periodo de 3 días.

Actualmente en esta vialidad se puede visualizar daños por fatiga en el pavimento (agrietamiento, baches y el desprendimiento de los materiales que constituyen la carpeta asfáltica). Lo que genera el incremento del tiempo de recorrido; puesto que la velocidad no es constante, además de propiciar accidentes de tránsito y elevar los costos de mantenimiento a los vehículos de usuarios frecuentes

Es de resaltar este corredor se caracteriza por ser una vía rápida que conecta a los municipios de la Heroica Ciudad de Puebla con San Andrés Cholula, satisfaciendo los principales motivos de viajes los cuales son: trabajo, estudio y esparcimiento.

OBJETIVO

Analizar el proceso de cálculo para la determinación del tránsito promedio diario anual y la tasa de crecimiento del Proyecto Quetzalcóatl elaborado en el 2014, para realizar una propuesta metodológica de estimación del tránsito diario.

Objetivos específicos

- Comparar el volumen de tránsito y la tasa de crecimiento obtenidos en 2014 con un periodo de aforo de 3 días, respecto al volumen y tasa de crecimiento obtenidos con una metodología de estimación de tránsito para casos donde no sea posible realizar aforos por una semana completa.
- Realizar la comparación de los ejes equivalentes con el cual se realizó el diseño de pavimento del Proyecto Quetzalcóatl, respecto a los ejes equivalentes obtenidos del cálculo de actualización de volumen y tasa de crecimiento.

Justificación

La Recta a Cholula está ubicada al poniente del municipio de Puebla, y oriente del Municipio de San Andrés Cholula de la zona metropolitana de la ciudad de Puebla.

El problema que se encuentra en la Recta a Cholula es la presencia de daño por fatiga en algunos tramos de esta vialidad, por donde circulan en promedio 76,683 vehículos diarios combinados de ambos sentidos, de acuerdo con las últimas cifras publicadas por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT) para el año 2022.

En la actualidad, el tránsito promedio diario anual (TPDA) que se registra en la zona de estudio genera daño por fatiga y deformación permanente, además de comenzar a tener congestiones a determinadas horas del día.

Por ello con este trabajo de investigación además de estar enfocado a una problemática real en el tramo de la vía Quetzalcóatl, se busca comprobar si la exactitud del cálculo de los volúmenes de tránsito y tasa de crecimiento para determinar la alternativa de pavimento empleada sigue teniendo un desempeño favorable a las condiciones actuales.

Hipótesis

Con lo descrito anteriormente esta investigación se encamina descartar o afirmar las siguientes hipótesis:

- Es posible estimar de forma confiable el tránsito diario, cuando los aforos no se pueden realizar en una semana completa.
- El sobre estimar o subestimar el crecimiento del tránsito afecta la vida útil del pavimento.

CAPÍTULO I INGENIERIA DE TRANSITO

1.1 Clasificación de las redes viales

En la actualidad se cuentan con diversas clasificaciones para las redes viales, a continuación, se describen algunas de las clasificaciones más comunes que podemos encontrar.

1.1.1 Clasificación funcional

En el proceso de planeación de una red vial, ya sea rural o urbana, se debe especificar de tal manera que se puedan definir las funciones específicas a las diversas carreteras y calles, para así satisfacer las necesidades de traslados de las personas y mercancías, de carácter inmediato, confortable y seguro, y a las necesidades de accesibilidad a las distintas áreas colindantes.

Para hacer de forma practica la movilidad se necesita de disponer de carreteras y calles rápidas, y para los accesos es de gran relevancia contar con calles y carreteras lentas. Esencialmente entre ambos extremos se presenta todo el sistema de carreteras (rurales) y calles (urbanas).

A grandes rasgos, las carreteras y las calles urbanas pueden clasificarse funcionalmente como: principales (arterias), secundarias (colectoras) y locales.

Las carreteras y calles principales se caracterizan por tener accesos controlados, con el fin de brindar movilidad a grandes volúmenes de tránsito de paso y de poco o nulo acceso a espacios laterales; por otra parte, las carreteras y calles locales poseen accesos no controlados, otorgando fácil acceso a espacios laterales, de menores volúmenes de tránsito y raramente utilizadas por el tránsito de paso. (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

La clasificación funcional ofrece soluciones a diversos problemas de las siguientes formas:

- Determinando la importancia relativa de las distintas carreteras y calles.
- Sentando las bases para la asignación de los niveles de servicio o especificaciones de proyecto.
- La apreciación de deficiencias, comparando la geometría o niveles de servicio con las especificaciones.
- Estimación de costos de tratamiento.

Con la clasificación funcional se facilita:

- Asignar responsabilidades para cada tipo de camino a nivel gubernamental.
- Aglomerar las calles y carreteras de acuerdo con el grado de atención de ingeniería y competencia administrativa.
- Establecer las bases para programas a largo plazo, implementación de prioridades y planeación fiscal.

1.1.2 Sistema vial urbano

Esta clasificación se sustenta en un sistema de jerarquías, a continuación, se detallan los conceptos que dan forma a esta clasificación, mostrado en la Ilustración 1:

Autopistas y vías rápidas: las autopistas facilitan el movimiento sin obstáculos de grandes volúmenes de tránsito entre zonas, a través o rodeando de la ciudad o áreas urbanas. Se caracterizan por un control total en sus accesos y con una delimitación con propiedades colindantes, además, una autopista tiene una separación total de los flujos conflictivos. (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Calles principales: son las que permiten el flujo de tránsito entre áreas o partes de una ciudad. Proveen de servicio a los puntos generadores de tránsito, y enlazan con las autopistas y vías rápidas. Pueden tener control parcial en sus accesos. (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Calles colectoras: conectan las calles principales con las calles locales, dotando de accesos a las áreas colindantes. (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Calles locales: ofrecen acceso directo a las zonas colindantes, sean áreas de residencia, comerciales, industriales o de algún otro uso. Se conectan directamente con las calles colectoras. (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

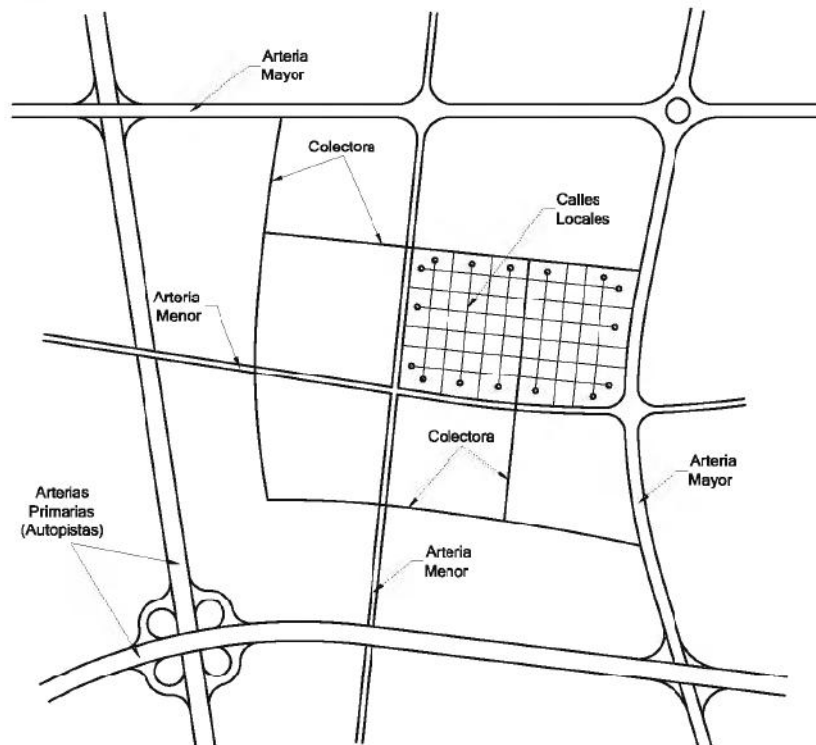


Ilustración 1 Jerarquía de un sistema vial, recuperada de: (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

1.2 Clasificación por sistema de carreteras

En México se pueden distinguir diversas clasificaciones del tipo de carreteras, a continuación, se describen la variedad que comprende esta clasificación:

1.2.1 Clasificación de transitabilidad

Se caracterizan por la etapa constructiva de la vialidad.

- Carretera en terracería: la superficie de rodamiento es de tierra, de fácil tránsito en tiempos secos.
- Carretera revestida: a la superficie de rodamiento se le ha colocado una capa de revestimiento, en la mayoría de los casos se trata de un agregado grueso; es transitable en cualquier época del año.
- Carretera pavimentada: la superficie de rodamiento ha recibido un procedimiento de pavimentación flexible (asfalto) o rígida (concreto hidráulico). (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

1.2.2 Clasificación administrativa.

Este nombre está sustentado en la dependencia de gubernamental que tiene a su cargo la construcción, operación y mantenimiento, la clasificación es la siguiente:

- Carretera federal: a cargo de la Federación.
- Carretera estatal: a cargo de organismos estatales (Juntas Locales de Caminos).
- Carretera vecinal: construida por cooperación de los pobladores de las localidades beneficiadas, la conservación pasa a manos de la clasificación anterior.
- Carretera de cuota: a cargo de Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos. La inversión es recuperable a través de los cobros de peaje.
- Carretera concesionada de cuota: a cargo de la iniciativa privada durante un lapso para la recuperación del capital invertido más utilidades.

1.2.3 Clasificación por jurisdicción federal.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana, NOM-012-SCT-2-2014 las carreteras tienen una clasificación como a continuación se describe:

- Tipo ET: son aquellas que la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes establece como parte de ejes de transporte las que por sus características geométricas y estructurales permiten la circulación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y peso. Pueden ser de 2, 4 o más carriles de circulación. (Transportes D. G., 2014)
- Tipo A: permiten la circulación de todos los vehículos autorizados con las máximas dimensiones, capacidad y pesos. Por sus características geométricas y estructurales. Pueden ser de 2, 4 o más carriles de circulación. (Transportes D. G., 2014)
- Tipo B: son carreteras de tipo primarias, cuentan con dos carriles que permiten la circulación a vehículos del tipo tractocamión de tres ejes y un semi remolque de tres ejes. (Transportes D. G., 2014)
- Tipo C: con carreteras de tipo secundarias, cuentan con dos carriles que permiten la circulación a vehículos del tipo tractocamión de tres ejes y un semi remolque de tres ejes.
- Tipo D: con carreteras de tipo alimentadoras, cuentan con dos carriles que permiten la circulación a vehículos del tipo camiones de tres ejes (Transportes D. G., 2014).

1.3 Clasificación vehicular en México.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2017, la clasificación de vehículos por especificaciones de peso, dimensiones y capacidad de los vehículos de transporte federal, servicios auxiliares y transporte privado, se dividen de la siguiente manera:

Definiciones:

Camión unitario: Vehículo automotor de seis o más llantas, destinado al transporte de carga con peso bruto vehicular mayor a 4 toneladas.

Camión remolque: Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un camión unitario con un remolque, acoplado mediante un convertidor.

Semirremolque: Vehículo sin eje delantero, destinado a ser acoplado a un tractocamión de manera que sea jalado y parte de su peso sea soportado por éste.

Tractocamión: Vehículo automotor destinado a soportar y arrastrar semirremolques.

Tractocamión articulado: Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un tractocamión y un semirremolque.

Tractocamión doblemente articulado: Vehículo destinado al transporte de carga, constituido por un tractocamión, un semirremolque y un remolque u otro semirremolque, acoplados mediante mecanismos de articulación.

1.3.1 Clasificación atendiendo su clase

Para fines de la norma NOM-012-SCT-2-2017 se clasifican en:

Atendiendo su clase, Tabla 1:

Tabla 1 Clasificación vehicular por clase, recuperada de: NOM-012-SCT-2-2017

Clase: Vehículo o configuración	Nomenclatura
Autobús	B
Camión unitario	C
Tractocamión	T
Convertidor	D
Camión Remolque	C-R
Tractocamión Articulado	T-S
Tractocamión Doblemente Articulado	T-S-R y T-S-T

Nomenclatura por número de ejes y llantas

1.3.2 Clasificación por nomenclatura, numero de ejes y llantas.

Para autobuses, ilustración 2, estos deben circular por los caminos y puentes de jurisdicción federal con luces encendidas permanentemente:




AUTOBUS (B)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
B2	2	6	
B3	3	8 o 10	
B4	4	10	

Ilustración 2, Autobuses, recuperada de: NOM-012-SCT-2-2017

Para camiones, ilustración 3, los camiones unitarios y camión remolque deben circular por caminos y puentes de jurisdicción federal con luces encendidas permanentemente.







CAMIÓN UNITARIO (C)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2	2	6	
C3	3	8-10	
CAMIÓN-REMOLQUE (C-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	VEHÍCULO
C2-R2	4	14	
C3-R2	5	18	
C2-R3	5	18	
C3-R3	6	22	

Ilustración 3 Camiones, recuperada de: NOM-012-SCT-2-2017

Para tractocamiones articulados, ilustración 4, los tractocamiones articulados deben circular por caminos y puentes de jurisdicción federal con luces encendidas permanentemente.



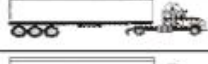



TRACTOCAMION ARTICULADO (T-S)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1	3	10	
T2-S2	4	14	
T2-S3	5	18	
T3-S1	4	14	
T3-S2	5	18	
T3-S3	6	22	

Ilustración 4 Tractocamiones Articulados, recuperada de: NOM-012-SCT-2-2017

Para Tractocamiones Semirremolque-Remolque, ilustración 5, deben circular por caminos y puentes de jurisdicción federal con luces encendidas permanentemente:


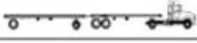
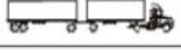







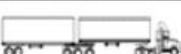
TRACTOCAMIÓN SEMIRREMOLQUE-REMOLQUE (T-S-R)			
NOMENCLATURA	NÚMERO DE EJES	NÚMERO DE LLANTAS	CONFIGURACIÓN DEL VEHÍCULO
T2-S1-R2	5	18	
T2-S2-R2	6	22	
T2-S1-R3	6	22	
T3-S1-R2	6	22	
T3-S1-R3	7	26	
T3-S2-R2	7	26	
T3-S2-R3	8	30	
T3-S2-R4	9	34	
T2-S2-S2	6	22	
T3-S2-S2	7	26	
T3-S3-S2	8	30	

Ilustración 5 Tractocamiones Semirremolque-Remolque, recuperada de: NOM-012-SCT-2-2017

1.4 Aforos vehiculares

El aforo vehicular es un conteo de vehículos que pasan por un punto a estudiar y a partir ellos se pueden obtener datos como los tipos de vehículos que transitan la zona, el volumen vehicular y la velocidad.

1.4.1 Métodos de aforo

A continuación, se mencionan los métodos más comunes para la ejecución de los aforos de tránsito:

Aforos manuales:

En general se realizan para contabilizar los volúmenes de giro y volúmenes de configuración vehicular, de acuerdo con el propósito del estudio este puede variar en su duración, algunos aforos de este tipo pueden durar hasta 24 horas. El equipo más utilizado para estos aforos va desde hojas de papel marcando el tipo de vehículo, hasta contadores electrónicos con teclado. Ambos son de ejecución manual.

Para periodos de tránsito alto, se necesita de personal capacitado, así se incrementa la exactitud y confiabilidad del estudio.

Contadores mecánicos:

Los contadores mecánicos son utilizados comúnmente para estudios de tendencia, pueden operar a través de células fotoeléctricas, detectores magnéticos y detectores de lazo.

Contadores portátiles:

Tienen un registro de los volúmenes aforados cada hora y 15 minutos, esto depende del modelo.

Pueden estar constituidos por dos tubos neumáticos u algún otro tipo de detector portátil.

1.5 Volúmenes de tránsito

Las vialidades al ser un sitio físico están sujetas a ser cargadas por volúmenes de tránsito, los cuales tienen por características ocupar el espacio y consumir tiempo. Las distribuciones espaciales de tránsito se originan a partir de los deseos de viajes entre puntos por el origen y el destino, ocupando así la oferta del medio ambiente circundante. La distribución temporal son el resultado de los estilos de vida de los usuarios ciertamente relacionados con los tiempos de viaje, desplazándose en ciertas épocas del año, días de la semana o en horas específicas del día. Al realizar la proyección de una carretera o calle, intersección, acceso y servicios, se fundamentan en los volúmenes de tránsito o la demanda que transita durante un intervalo de tiempo dado, de su diversificación, tasa de

crecimiento y composición. Los errores que se tengan al realizar la determinación de estos datos tendrán como consecuencia que los espacios viales atiendan un a volumen de tránsito inferior al proyecto, o mal con problemas de congestión por volúmenes superiores a los proyectados.

Los estudios de volúmenes de tránsito son elaborados con la intención de recabar la información relacionada con el desplazamiento de los vehículos y/o personas en zonas específicas dentro de un sistema vial. (Rafael Cal y Mayor R., 2016).

1.5.1 Conceptos

Volumen, tasa de flujo, demanda y capacidad.

En la ingeniería de tránsito, la manera más rápida de obtener los datos es mediante el conteo o aforo, ya sea de vehículos, peatones, ciclistas y pasajeros. Teniendo como resultado las estimaciones de:

- Volumen (Q)
- Tasa de flujo (q)
- Demanda (D)
- Capacidad (C)

Estos parámetros guardan una relación entre si y la manera de expresarlos son las mismas unidades, sin embargo, el significado no es el mismo. A continuación, se explica el significado.

Volumen: es el número de vehículos (o personas) que pasan por un punto durante un periodo específico.

Tasa de flujo: es la frecuencia de paso de los vehículos (o personas) durante un tiempo en específico menor a una hora, expresada como una tasa horaria equivalente.

Demanda: número de vehículos (o personas) que desean viajar y pasan por una zona durante un tiempo específico.

Capacidad: es una característica de los sistemas viales que representa la oferta, es decir; el número máximo de vehículos que pueden pasar por un punto durante un tiempo en específico.

En conjunto puede definirse como, la demanda es una medida del número de vehículos (o personas) que esperan ser servidos, distintos de los que son servidos (volumen) y de los que pueden ser servidos (capacidad). (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Por lo anterior, se define como *volumen de tránsito*, como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal específica, de un carril o de una calzada, durante un periodo determinado, y se expresa como la ecuación 1:

$$Q = \frac{N}{t}$$

Ecuación 1.- *Volumen de tránsito, recuperada de:* (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Donde:

Q = vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/periodo).

N= número total de vehículos que pasan (vehículos)

t= periodo determinado (unidades de tiempo).

1.5.2 Volúmenes de tránsito totales.

De acuerdo con el número de vehículos que pasan durante un determinado lapso y dependiendo de la duración de este, se obtienen los siguientes volúmenes de tránsito totales:

- Tránsito anual (TA)

Es el total de vehículos que pasan en el transcurso de un año. Para este caso t=1 año.

- Tránsito mensual (TM)

Es el total de vehículos que pasan en el transcurso de un mes. Para este caso t=1 mes.

- Transito semanal (TS)

Es el total de vehículos que pasan en el transcurso de una semana. Para este caso $t=1$ semana.

- Transito diario (TD)

Es el total de vehículos que pasan en el transcurso de un día. Para este caso $t=1$ día.

- Transito horario (TH)

Es el total de vehículos que pasan en el transcurso de una hora. Para este caso $t=1$ hora.

- Tránsito en un periodo inferior a una hora (Q)

Es el total de vehículos que pueden pasar en un periodo menor a una hora. Para este caso $t < 1$ hora y donde i , por lo general el periodo se representa en minutos. Por ejemplo, Q_{15} es el volumen de tránsito total en 15 minutos. De la misma forma Q_5 es el volumen de tránsito total en 5 minutos. (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

1.5.3 Volúmenes de tránsito promedios diarios.

“Se define como transito promedio diario (TDP), como el número de vehículos que pasan durante un periodo determinado (en días completos) igual o menor a un año y mayor que un día, dividido por el número de días del periodo”. (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Como se observa en la Ecuación 2:

$$T = \frac{N}{1 \text{ día} < t \leq 1 \text{ año}}$$

Ecuación 2, *Transito diario, recuperada de:* (G., 2016)

Donde:

N: representa el número de vehículos que pasan

t: Periodo de días

Con base al número de días del periodo. A continuación, se mencionan los volúmenes de tránsito promedio diario, dados en vehículos por día:

1.- Transito promedio diario anual, ecuación 3.

$$TPDA = \frac{TA}{365}$$

Ecuación 3, *Promedio diario anual, recuperada de (G., 2016)*

2.- Transito promedio semanal, ecuación 4.

$$TPDM = \frac{TA}{30}$$

Ecuación 4, *Transito promedio semanal, recuperada de (G., 2016)*

3.- Transito diario semanal, ecuación 5.

$$TPDS = \frac{TA}{7}$$

Ecuación 5, *Transito diario semanal, recuperada de (G., 2016)*

1.5.4 Volúmenes de tránsito horarios

Teniendo una hora seleccionada, los volúmenes de tránsito se definen de la siguiente manera:

- Volumen horario máximo anual (VHMA)

Es la hora con mayor tránsito durante las 8,760 horas del año.

- Volumen horario de máxima demanda (VHMD)

Es número máximo de vehículos que transitan por un punto en específico o en un carril durante 60 minutos consecutivos, es decir; es una representación de los periodos de máxima demanda que se pueden tener en un día en particular.

- Volumen horario de proyecto o diseño (VHP)

Es el volumen de tránsito horario con el que se basa el diseño de las características geométricas de una vialidad. (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

1.6 Volúmenes de tránsito futuro

1.6.1 Relación entre los volúmenes de tránsito promedio diario, anual y semanal

Caracterizar el comportamiento de un suceso es mejor tener caracterizado todo el universo de datos.

En el caso de los volúmenes de tránsito, el tamaño de la población ésta limitado por el espacio y el tiempo para las variables asociadas al mismo.

Para obtener el tránsito promedio diario anual (TPDA), es necesario tener el número de total de vehículos que pasan durante un año por el punto o sección a evaluar. Esto se obtiene realizando aforos continuos en el transcurso del año, esto puede ser en periodos horarios, diarios, semanales o mensuales.

Ocasionalmente el adquirir esta información anual es difícil, para la mayoría de las vialidades, esto a causa de los costos que implica recabar los datos. Sin embargo, actualmente se puede recabar esta información a través de datos publicados por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT), que coloca estaciones maestras en la mayoría de las carreteras que conforman la red vial primaria del país.

Sin embargo, antes de que los resultados se puedan generalizar, se debe estudiar la variabilidad de la muestra para incrementar la confiabilidad, que se puede aplicar a otro número de casos no incluidos, y que forman parte de las características de la población.

Por lo anterior, para el estudio de volúmenes de tránsito, la media poblacional o tránsito promedio diario anual TPDA, se estima con base en la media muestral o tránsito promedio diario semanal TPDS. (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

En casos de este estudio donde el aforo no es extenso, el cálculo del TPDA, se puede estimar de la siguiente manera, ecuación 6:

$$TPDA=TPDS + A$$

Ecuación 6, *Estimación de TPDA, recuperada de (G., 2016)*

Donde:

A= máxima diferencia entre el TDPA y el TPDS

Para ello debemos tener el valor de confianza, el cual lo calculamos siguiendo la ecuación 7:

$$A=K*E$$

Ecuación 7, *Valor de confianza, recuperada de: (G., 2016)*

Donde:

k= Numero de desviaciones estándar correspondiente al nivel de confianza

E=error estándar de la media

En términos estadísticos, se puede decir que las medias tomadas de la misma población se distribuyen normalmente alrededor de una media poblacional, por lo que se deduce que la desviación estándar es equivalente al error estándar, ecuación 8:

$$E=\sigma$$

Ecuación 8, *Error estándar, recuperada de: (G., 2016)*

Donde:

σ = Estimador de la desviación estándar poblacional

Para determinar el valor de la desviación estándar poblacional σ , se puede realizar usando la siguiente ecuación 9.

$$\hat{\sigma} = \frac{S}{\sqrt{n}} \left(\sqrt{\frac{N-n}{N-1}} \right)$$

Ecuación 9, *Desviación estándar, recuperada de:* (G., 2016)

Donde:

S= Derivación estándar de la distribución de los volúmenes de tránsito diario o desviación muestral.

n= tamaño de la muestra, en número de días del aforo.

N= Tamaño de la población, en número de días del año.

El cálculo de la desviación estándar muestral S, se calcula con la ecuación 10:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TD_i - TPDS)^2}{n-1}}$$

Ecuación 10, *Desviación estándar muestral, recuperada de:* (G., 2016)

Donde:

TD_i = Volumen de tránsito del día i

Para terminar, el cálculo de la relación de los volúmenes de tránsito promedio diario anual y semanal se realiza con la ecuación 6:

$$TPDA = TPDS + A$$

Expresado de otra manera:

$$TPDA = TPDS \pm K\hat{\sigma}$$

Ecuación 11, *Relación del TPDA y TPDS, recuperada de:* (G., 2016)

Para la distribución normal, en la siguiente tabla se presentan los niveles de confiabilidad correspondiente a los valores de la constante k.

Constante K	Nivel de Confiabilidad (%)
1.00	68.3
1.50	89.6
1.64	90.0
1.96	95.0
2.00	95.5
2.50	98.8
2.58	99.0
3.00	99.7

Ilustración 6 nivel de confiabilidad, fuente: (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

1.6.2 Pronóstico del volumen de tránsito futuro

En el pronóstico del volumen de tránsito futuro, para el caso del TPDA del año de proyecto, en la construcción de un nuevo tramo carretero o el mejoramiento de una carretera existente, deberá basarse en los volúmenes normales actuales y el incremento del tránsito que se espera utilicen la nueva vialidad o la existente. (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Los proyectos más frecuentes son:

- **Proyectos de construcción:** es el conjunto de todas las obras de infraestructura a ejecutar en una carretera nueva proyectada, o en un tramo faltante mayor al 30% de una carretera existente y/o en variantes (libramientos).
- **Proyectos de mejoramiento:** consiste básicamente en el cambio de especificaciones y dimensiones de la carretera o puentes; para lo cual, se hace necesaria la construcción de obras en infraestructura ya existente, que permitan una adecuación de la carretera a los niveles de servicio requeridos por el tránsito actual y proyectado.
- **Proyectos de rehabilitación:** actividades que tienen por objeto reconstruir o recuperar las condiciones iniciales de la carretera, de manera que se cumplan las especificaciones técnicas con que fue diseñada.
- **Proyectos de mantenimiento rutinario:** se refiere a la conservación continua (a intervalos menores a un año) de las zonas laterales, y a intervenciones de

emergencias en la carretera, con el fin de mantener las condiciones óptimas para su transitabilidad.

- Proyectos de mantenimiento periódico: comprende la realización de actividades de conservación a intervalos variables, relativamente prolongados (3 a 5 años), destinados primordialmente a recuperar los deterioros de la capa de rodadura ocasionados por el tránsito y los fenómenos climáticos.

1.6.3 Regresiones matemáticas para el cálculo de volúmenes de tránsito futuro

Para adquirir una estimación de los volúmenes de tránsito futuro, para la mayoría de los casos carreteras y vialidades interurbanas, donde se cuenta con datos de las series históricas de los volúmenes de tránsito promedio diario TPDA, se utilizan las regresiones lineales y curvilíneas, tipos línea recta, exponencial, potencial y logarítmica. (Rafael Cal y Mayor R., 2016) (Transportes S. d., 2021)

1.6.3.1 Regresión lineal simple (línea de mínimos cuadrados)

Es una técnica de modelo estadístico empleado para hallar una variable de respuesta continua en función de varias variables conocidas. Esta estimación se realiza a través de la recta de regresión trazada.

Por lo tanto, se puede decir que cualquier x_i , le corresponde un valor observado y_i (real) y un valor estimado \hat{y}_i (teórico).

La ecuación 12 de la recta de regresión es:

$$= a*x+b$$

Ecuación 12, *Regresión lineal, recuperada de:* (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

1.6.3.2 Regresión curvilínea tipo exponencial

Es un modelo de regresión cuya se relaciona a la variable independiente (valor a estimar) y la variable dependiente (valores conocidos), mediante una ecuación 13 exponencial.

$$= a * e^{b*x}$$

Ecuación 13, *Regresión exponencial, recuperada de:* (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

1.6.3.3 Regresión curvilínea tipo potencial

Siguiendo el mismo procedimiento de los dos casos anteriores, para cualquier x_i existe un valor observado y_i (real), el cual es estimado a través de \hat{y}_i (teórico), mediante la siguiente ecuación 14 potencial:

$$= a * (x^b)$$

Ecuación 14, *Regresión potencial, recuperada de:* (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

1.6.3.4 Regresión curvilínea tipo logarítmica

Para cualquier x_i existe un valor observado y_i (real), el cual es estimado a través de \hat{y}_i (teórico), mediante la siguiente ecuación 15 logarítmica:

$$Y; = a + (b * \ln x)$$

Ecuación 15, *Regresión logarítmica, recuperada de:* (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

CAPITULO II INGENIERIA DE PAVIMENTOS

2.1 Estructura del pavimento

2.1.1 Terraplén

La capa de Terraplén se entiende como la parte de la terracería que da la conformación del terreno natural hasta el nivel de desplante de la capa subyacente utilizando suelos y fragmentos de roca, con origen de extracción de banco o productos de corte. (Transportes S. d., 2021)

De acuerdo con la norma **N•CMT•1•01/21** publicada por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT)

Para los requisitos de calidad se tomará en cuenta lo siguiente

los materiales para utilizar cumplirán con los requisitos que se establecen en la siguiente Tabla 2:

*Tabla 2 Requisitos de calidad de materiales para terraplén, recuperada de:
(Transportes S. d., 2021)*

Características	Valor
Límite líquido; %, máximo	50
Valor Soporte de California (CBR) ^[1] ; %, mínimo	5
Expansión; %, máxima	5
Grado de compactación ^[2] ; %	90 ± 2

2.1.2 Subyacente

Dentro del proceso constructivo de la estructura del pavimento flexible y conformación de las capas de terracerías se encuentra la subyacente a la cual que se ubica sobre el terraplén, misma que debe estar constituida por suelos y fragmentos de roca, con origen de extracción de banco o productos de corte. (Transportes S. d., 2021)

De acuerdo con la norma **N•CMT•1•02/21** publicada por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT)

Para los requisitos de calidad se tomará en cuenta lo siguiente:

Los materiales que se utilicen para la formación de la capa subyacente, en función de sus características y de la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento, cumplirán con lo que se indica a continuación.

Tenemos como condicionantes las siguientes situaciones.

- 1.- Cuando la intensidad del tránsito (L) sea menor de diez mil (10 000) ejes equivalentes, no se requiere la capa subyacente.
- 2.- Cuando la intensidad del tránsito (L) sea de 10 000 a 1 millón de ejes equivalentes, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 3 de esta Norma y tendrá un espesor mínimo de 30 centímetros.
3. Cuando la intensidad del tránsito (L) sea de 1 millón a 10 millones de ejes equivalentes, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 3 de esta Norma y tendrá un espesor mínimo de 70 centímetros.
- 4.- Cuando la intensidad del tránsito (L) sea mayor de diez (10) millones de ejes equivalentes, la capa subyacente será motivo de diseño especial.
- 5.- Si la capa subyacente se desplanta directamente sobre el terreno de cimentación y su espesor es menor que el señalado en los puntos 2 o 3, según corresponda, cuando el material del terreno de cimentación no cumpla con los requisitos establecidos en la Tabla 3, se excavará una caja hasta la profundidad necesaria para completar el espesor mínimo

*Tabla 3 Requisitos de calidad de materiales para subyacente, recuperada de:
(Transportes S. d., 2021)*

Característica	Valor
Tamaño máximo y granulometría	Que sea compactable ^[1]
Límite líquido; %, máximo	50
Valor Soporte de California (CBR) ^[2] ; %, mínimo	10
Expansión; %, máxima	3

Grado de compactación ^[3] ; %	95 ± 2
--	--------

[1] De acuerdo con lo indicado en el Manual M-MMP-1-02, *Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos*.

[2] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al óptimo de compactación respecto a la masa volumétrica será máxima obtenida mediante la prueba AASHTO estándar, salvo que el proyecto indique otra cosa.

[3] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

2.1.3 Subrasante

Es la capa con la se da el desplante de la estructura del pavimento, se ubica sobre la capa de subyacente o del terraplén de acuerdo con el proceso constructivo del proyecto a ejecutar, los materiales, los materiales para la capa de subrasante son los suelos naturales, seleccionados o cribados, producto de los cortes o de la extracción en bancos. (Transportes S. d., 2021)

De acuerdo con la norma **N•CMT•1•03/21** publicada por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT)

Para los requisitos de calidad se tomará en cuenta lo siguiente:

Los materiales que se utilicen para la formación de la capa subrasante, en función de sus características y de la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de 8.2 toneladas, acumulados durante la vida útil del pavimento (L), cumplirán con lo que se indica a continuación, a menos que exista un estudio previamente aprobado por la Secretaría, que justifique el empleo de materiales con características distintas. En ningún caso se utilizarán materiales altamente orgánicos como turba.

Teniendo como condicionantes las siguientes situaciones.

Teniendo como condicionantes las siguientes situaciones.

1.- Cuando la intensidad del tránsito (L) sea igual a 1 millón de ejes equivalentes o menor, el material cumplirá con las características granulométricas y con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 4 y tendrá un espesor mínimo 20 centímetros.

2.- Cuando la intensidad del tránsito (L) sea de 1 millón a 10 millones de ejes equivalentes, el material cumplirá con los requisitos de calidad que se establecen en la Tabla 4 y tendrá un espesor mínimo de 30 centímetros.

3.- Cuando la intensidad del tránsito (L) sea mayor de 10 millones de ejes equivalentes, la capa subrasante será motivo de diseño especial.

4.- Si la capa subrasante se desplanta directamente sobre el terreno de cimentación y su espesor es menor que el señalado en los puntos 1 o 2, según corresponda, cuando el material del terreno de cimentación no cumpla con los requisitos establecidos, se excavará una caja hasta la profundidad necesaria para completar el espesor mínimo.

Tabla 4 Requisitos de calidad de materiales para capa subrasante, recuperada de: (Transportes S. d., 2021)

Características	Valor
Tamaño máximo; mm	76
Límite líquido; %, máximo	40
Índice plástico; %, máximo	12
Valor Soporte de California (CBR) ^[1] ; %, mínimo	20
Expansión máxima; %	2
Grado de compactación ^[2] ; %	100 ± 2

[1] En especímenes compactados dinámicamente al porcentaje de compactación indicado en esta Tabla, con un contenido de agua igual al óptimo de compactación respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, salvo que el proyecto indique otra cosa.

[2] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Estándar, del material compactado con el contenido de agua óptimo de la prueba, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

2.1.4 Subbase hidráulica

La subbase es una capa constituida por material granular que se coloca sobre la capa subrasante. (Transportes S. d., Materiales para Subbases, N·CMT·4·02·001/21, 2021)

De acuerdo con el tratamiento que se le da al material reciben la siguiente clasificación publicada en la norma N·CMT·4·02·001/21 publicada por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT):

1.- Materiales naturales

Son las arenas, gravas y limos, así como rocas muy alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria para cumplir con los requisitos de calidad establecidos en esta norma.

2.- Materiales cribados

Son las arenas, gravas y limos, así como las rocas alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria que, para hacerlos utilizables, requieren de un tratamiento mecánico de cribado, con el equipo adecuado, para eliminar las partículas mayores al tamaño máximo establecido en esta Norma.

3.- Materiales parcialmente triturados

Son los poco o nada cohesivos, como mezclas de gravas, arenas y limos, que al extraerlos quedan sueltos o pueden ser disgregados que, para ser utilizables, requieren un tratamiento mecánico de trituración parcial y cribado, con el equipo adecuado, para aprovechar las partículas mayores que el tamaño máximo establecido en esta Norma y satisfacer la composición granulométrica.

4.- Materiales totalmente triturados

Son los materiales extraídos de un banco o pepenados, que requieren un tratamiento mecánico de trituración total y cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

5.- Materiales mezclados

Son los que se obtienen mediante la mezcla de dos o más de los materiales a que se refieren en los puntos 1 a 4., en las proporciones necesarias para satisfacer los requisitos de calidad establecidos en la Norma.

Requisitos de calidad para subbases de pavimentos asfálticos

El material natural, cribado, parcialmente triturado, totalmente triturado o mezclado, que se emplee en la construcción de subbases para pavimentos asfálticos, cumplirá con los requisitos de calidad que se indican a continuación:

El material tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 5 y se muestran en la ilustración 7, considerando que el tamaño máximo de sus partículas no será mayor de 25 % del espesor de la subbase, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 6, en función de la intensidad del tránsito en términos del número de ejes equivalentes acumulados, de 8.2 toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento (L).

Tabla 5 Requisitos de granulometría de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos, recuperada de: (Transportes S. d., Materiales para Subbases, N·CMT·4·02·001/21, 2021)

Malla		Porcentaje que pasa [1]	
Abertura Mm	Designación	L 106 [2]	L > 106 [2]
75	3 in	100	100
50	2 in	85 – 100	85 – 100
37,5	1½ in	75 – 100	75 – 100
25	1 in	62 – 100	62 – 100
19	¾ in	54 – 100	54 – 100
9,5	in	40 – 100	40 – 100
4,75	N°4	30 – 100	30 – 80
2	N°10	21 – 100	21 – 60
0,85	N°20	13 – 92	13 – 45
0,425	N°40	8 – 75	8 – 33
0,25	N°60	5 – 60	5 – 26
0,15	N°100	3 – 45	3 – 20
0,075	N°200	0 – 25	0 – 15

[1] El tamaño máximo de las partículas no será mayor de 25 % del espesor de la subbase.

[2] L = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

La curva granulométrica del material por emplear, determinada mediante el procedimiento contenido en el Manual M·MMP·4·01·003, *Granulometría*, tendrá una forma semejante a la de las curvas que se muestran en la ilustración 7 de este documento, sin cambios

bruscos de pendiente. La relación entre el porcentaje en masa que pase la malla con abertura de 0,075 milímetros (N°200) al que pase la malla con abertura de 0,425 milímetros (N°40) no será mayor 0,65.

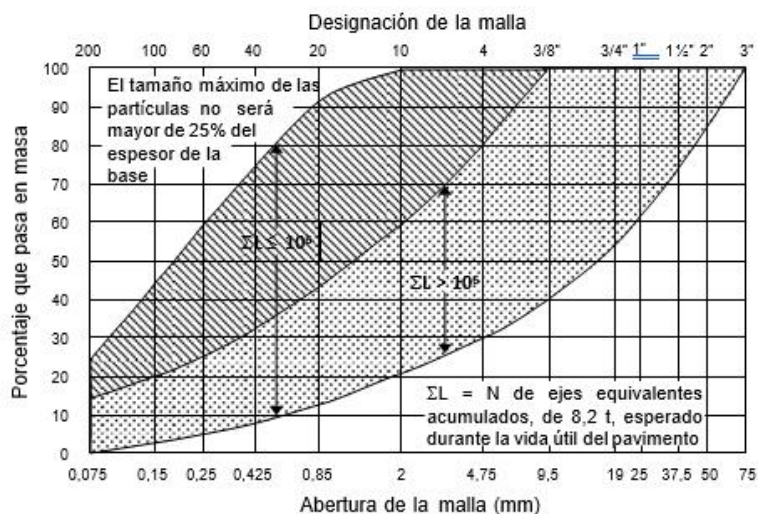


Ilustración 7 Zonas granulométricas recomendables de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos, imagen recuperada de N·CMT·4·02·001/21

Tabla 6.- Requisitos de calidad de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos, tabla recuperada de: (Transportes S. d., Materiales para Subbases, N·CMT·4·02·001/21, 2021)

Características	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Límite líquido [2], máximo	30	25
Índice plástico [2], máximo ¹	10	6
Valor Soporte de California (CBR) [2, 3], mínimo	50	60
Equivalente de arena [2], mínimo	30	40
Desgaste Los Angeles [2], máximo	50	40
Grado de compactación [2, 4], mínimo	100	100

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinado mediante el procedimiento de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

[3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

Si la granulometría del material obtenido en un banco, una vez sujeto al tratamiento mecánico, no cumple con los requisitos establecidos en esta Norma, se podrá mezclar con materiales de otros bancos, en la proporción adecuada para que cumpla con dichos

requisitos, en ningún caso es aceptable mezclar con materiales finos que agreguen plasticidad a la mezcla. Una vez establecido el proporcionamiento, el Contratista de Obra será el responsable de los procedimientos de mezclado de los materiales, para garantizar la homogeneidad de estos, evitando su segregación o degradación.

2.1.5 Base hidráulica

Es la capa estructura que se ubica sobre la subbase y se construye en su mayoría con materiales granulares tales como arenas, gravas y materiales finos, cuya función es dar apoyo a la base del pavimento asfáltico o de concreto hidráulico. (Transportes S. d., 2022; Transportes S. d., 2022)

De acuerdo con el tratamiento que se le da al material reciben la siguiente clasificación publicada en la norma **N·CMT·4·02·002/21** publicada por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT):

1.- Materiales naturales

Son las arenas, gravas y limos, así como rocas muy alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria para cumplir con los requisitos de calidad establecidos en esta norma.

2.- Materiales cribados

Son las arenas, gravas y limos, así como las rocas alteradas y fragmentadas, que al extraerlos quedan sueltos o pueden disgregarse mediante el uso de maquinaria que, para hacerlos utilizables, requieren de un tratamiento mecánico de cribado, con el equipo adecuado, para eliminar las partículas mayores al tamaño máximo establecido en esta Norma.

3.- Materiales parcialmente triturados

Son los poco o nada cohesivos, como mezclas de gravas, arenas y limos, que al extraerlos quedan sueltos o pueden ser disgregados que, para ser utilizables, requieren un tratamiento

mecánico de trituración parcial y cribado, con el equipo adecuado, para aprovechar las partículas mayores que el tamaño máximo establecido en la Norma y satisfacer la composición granulométrica.

4.- Materiales totalmente triturados

Son los materiales extraídos de un banco o pepenados, que requieren un tratamiento mecánico de trituración total y cribado, con el equipo adecuado, para satisfacer la composición granulométrica.

5.- Materiales mezclados

Son los que se obtienen mediante la mezcla de dos o más de los materiales a que se refieren en los puntos 1 a 4., en las proporciones necesarias para satisfacer los requisitos de calidad establecidos en la Norma.

Para este caso de estudio se describirán los requisitos de calidad para bases hidráulicas que después de su construcción recibirán una capa superior de material asfáltico

1- Cuando inmediatamente después de la construcción de la base se coloque una carpeta de mezcla asfáltica de granulometría densa, ya sea en caliente o en frío, el material para la base tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 7 y se muestran en la ilustración 8 de la norma, considerando que su tamaño máximo de partículas no será mayor 20 % del espesor de la base, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 8 de este documento y en función del número de ejes equivalentes (L) acumulados, de 8.2 toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento.

2.- Cuando sobre la base que se construya se coloque solamente un tratamiento asfáltico superficial, el material para la base tendrá las características granulométricas que se establecen en la Tabla 9 y se muestran en la ilustración 9 de este documento, considerando que su tamaño máximo de partículas no será mayor de 20% del espesor de la base, con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 8 de este documento, en función del número de ejes equivalentes (L) acumulados, de 8.2 toneladas, esperado durante la vida útil del pavimento.

Tabla 7 Requisitos de granulometría de los materiales para bases de pavimentos asfálticos, recuperada de: (Transportes S. d., 2022)

Malla		Porcentaje que pasa ^[1]	
Abertura mm	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ [2]	$\Sigma L > 10^6$ [2]
75	3 in	100	100
50	2 in	85 – 100	85 – 100
37,5	1½ in	75 – 100	75 – 100
25	1 in	62 – 100	62 – 90
19	¾ in	54 – 100	54 – 83
9,5	in	40 – 100	40 – 65
4,75	Nº4	30 – 80	30 – 50
2	Nº10	21 – 60	21 – 36
0,85	Nº20	13 – 44	13 – 25
0,42	Nº40	8 – 31	8 – 17
5			
0,25	Nº60	5 – 23	5 – 12
0,15	Nº100	3 – 17	3 – 9
0,07	Nº200	0 – 10	0 – 5
5			

[1] El tamaño máximo de las partículas no será mayor de 20% del espesor de la base.

[2] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

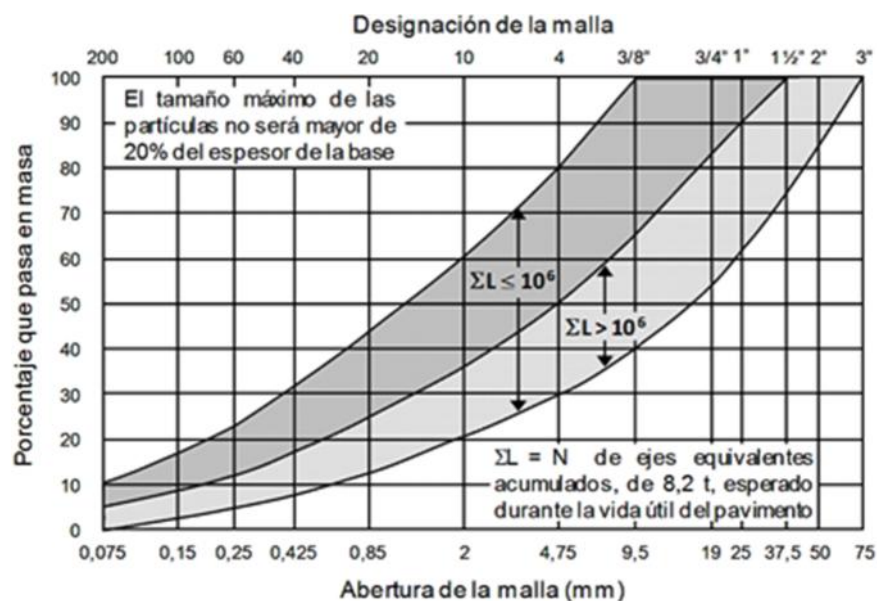


Ilustración 8.- Zonas granulométricas recomendables de los materiales para subbases de pavimentos asfálticos, recuperada de: (Transportes S. d., 2022)

La curva granulométrica del material por emplear, determinada mediante el procedimiento contenido en el Manual M·MMP·4·01·003, *Granulometría*, tendrá una forma semejante a la de las curvas que se muestran en la ilustración 8, sin cambios bruscos de pendiente.

La relación entre el porcentaje en masa que pase la malla con abertura de 0.075 milímetros (N°200) al que pase la malla con abertura de 0,425 milímetros (N°40) no será mayor de 0,65.

Tabla 8.- Requisitos de calidad de los materiales para bases de pavimentos asfálticos, recuperada de: (Transportes S. d., 2022)

Características [2]	Valor %	
	$\Sigma L \leq 10^6$ [1]	$\Sigma L > 10^6$ [1]
Límite líquido, máximo	25	25
Índice plástico, máximo	6	6
Equivalente de arena, mínimo	40	50
Valor Soporte de California (CBR) [3], mínimo	80	100
Desgaste Los Ángeles, máximo	35	30
Partículas alargadas, máximo	40	35
Partículas lajeadas, máximo	40	35
Grado de compactación [4], mínimo	100	100

[1] ΣL = Número de ejes equivalentes acumulados, de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

[2] Determinada mediante el procedimiento de prueba que corresponda, de los Manuales que se señalan en la Cláusula C. de esta Norma.

[3] Con el grado de compactación indicado en esta Tabla.

[4] Respecto a la masa volumétrica seca máxima obtenida mediante la prueba AASHTO Modificada, salvo que el proyecto o la Secretaría indiquen otra cosa.

Tabla 9.- Requisitos de granulometría de los materiales para bases que sean cubiertas sólo con un tratamiento asfáltico superficial, recuperada de: (Transportes S. d., 2022)

Malla		Porcentaje que pasa [1]	
Abertura (mm)	Designación	$\Sigma L \leq 10^6$ [2]	$\Sigma L > 10^6$ [2]
75	3 in	100	100
50	2 in	85 – 100	85 – 100
37,5	1½ in	75 – 100	75 – 100
25	1 in	62 – 100	62 – 90
19	¾ in	54 – 100	54 – 83
9,5	in	40 – 83	40 – 65
4,75	N°4	30 – 67	30 – 50
2	N°10	21 – 50	21 – 36
0,85	N°20	13 – 37	13 – 25
0,42	N°40	8 – 28	8 – 17
5			
0,25	N°60	5 – 22	5 – 12
0,15	N°100	3 – 17	3 – 9
0,07	N°200	0 – 10	0 – 5
5			

[1] El tamaño máximo de las partículas no será mayor de 20% del espesor de la base.

[2] ΣL = Número de ejes equivalentes de 8,2 t, esperado durante la vida útil del pavimento.

6.- Si la granulometría del material obtenido en un banco, una vez sujeto al tratamiento mecánico, no cumple con los requisitos establecidos en esta Norma, se podrá mezclar con materiales de otros bancos, en la proporción adecuada para que cumpla con dichos requisitos, en ningún caso es aceptable mezclar con materiales finos que agreguen plasticidad a la mezcla. Una vez establecido el proporcionamiento, el Contratista de Obra será el responsable de los procedimientos de mezclado de los materiales, para garantizar la homogeneidad de estos, evitando su segregación o degradación.

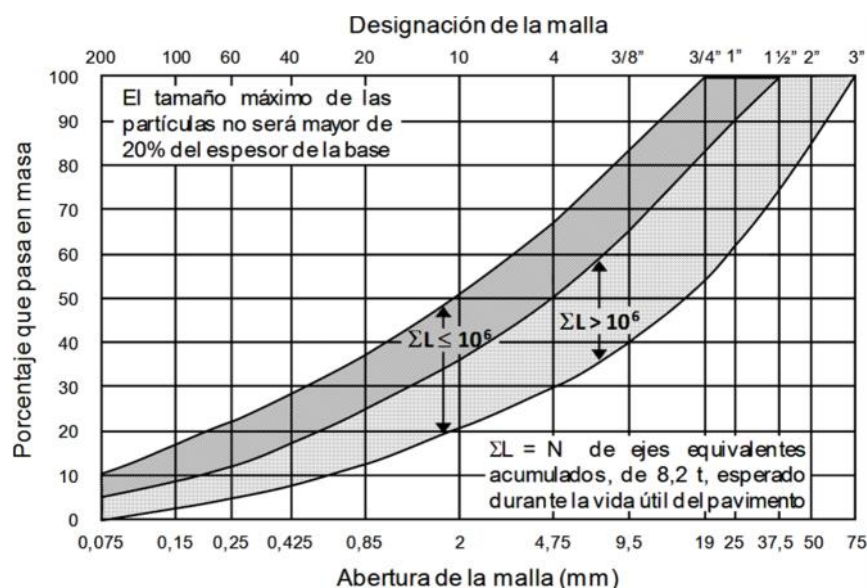


Ilustración 9.- Zonas granulométricas recomendables de los materiales para bases de pavimentos con solamente un tratamiento asfáltico superficial, recuperada de: (Transportes S. d., 2022)

2.2 Mezclas asfálticas para carreteras.

La mezcla asfáltica es el producto de la combinación de agregados pétreos y un aglutinante en este caso el cemento asfáltico, con la cual se construye la superficie de rodadura llamada carpeta asfáltica. (Transportes S. d., Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras, N·CMT·4·05·003/16, 2016)

Este trabajo se limitará a describir las mezclas asfálticas en caliente por el procedimiento de mezclado, se clasifican de la siguiente manera.

2.2.1 Mezcla asfáltica de granulometría densa

Este tipo de mezclas son usadas frecuentemente en pavimentos nuevos en los que se requiera alta resistencia estructural, renivelaciones y refuerzo de pavimentos existentes.

Tiene como características que son mezclas en caliente, uniformes y homogéneas, elaboradas con cemento asfáltico y materiales pétreos bien graduados, con tamaño nominal entre 37.5 milímetros (1½ in) y 9.5 milímetros (¾ in), que cumplan los requisitos de calidad de la Norma N·CMT·4·04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. (Transportes S. d., *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*, N·CMT·4·05·003/16, 2016)

2.2.2 Mezcla asfáltica de granulometría abierta

Este tipo de mezclas asfálticas son construidas sobre capas de granulometría densa y no tienen ninguna función estructural, es decir; la finalidad de esta mezcla es permitir mayor calidad de rodamiento del tránsito haciendo que el agua de lluvia se desplace a través de los neumáticos de los vehículos, haciendo uso de los vacíos de la carpeta, incrementando así la fricción de las llantas con la superficie de rodadura, minimizando el fenómeno de acuaplaneo, reduciendo la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos contiguos y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal. Esta mezcla asfáltica de granulometría abierta no se colocará en zonas propensas al congelamiento ni donde la precipitación sea menor de seiscientos (600) milímetros por año. (Transportes S. d., *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras*)

Esta la mezcla en caliente tiene por característica ser uniforme, homogénea y con un alto porcentaje de vacíos, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría uniforme, con tamaño nominal entre 12.5 milímetros (½ in) y 6.3 milímetros (¼ in), que cumplan los requisitos de calidad establecidos en la Cláusula E. de la Norma N·CMT·4·04, *Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*.

2.2.3 Mezcla asfáltica de granulometría discontinua, tipo SMA

El uso de esta mezcla asfáltica tiene por finalidad mejorar las condiciones de circulación de los vehículos respecto a las mezclas asfálticas convencionales. Esto se logra al tener una macrotextura que evita el agua de lluvia forme películas de agua sobre el pavimento favoreciendo al drenaje de este, reduciendo de esta manera el fenómeno de acuaplaneo reduciendo la cantidad de agua que se impulsa sobre los vehículos contiguos y se mejora la visibilidad del señalamiento horizontal, además de reducir el ruido hacia el entorno por la fricción entre las llantas y la superficie de rodadura. (Transportes S. d., Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras, N·CMT·4·05·003/16, 2016)

Esta mezcla asfáltica en caliente tiene por características ser uniforme y homogénea, elaborada con cemento asfáltico y materiales pétreos de granulometría discontinua, con tamaño nominal entre 19.0 milímetros ($\frac{3}{4}$ in) y 9.5 milímetros ($\frac{1}{2}$ in), que satisfagan los requisitos de calidad establecidos en la Norma N·CMT·4·04, Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas.

2.3 Pruebas de calidad de los materiales

2.3.1 Granulometría de materiales

Esta prueba permite caracterizar la estructura por tamaños (granulometría) de las partículas del agregado pétreo ya sean gruesos o finos en subbases, bases hidráulicas y carpetas asfálticas, a través de su paso por una serie de cribas (mallas) con aberturas determinadas. (Transportes S. d., Granulometria de Materiales Pétreos para mezclas asfálticas, M·MMP·4·04·002/02 , 2002)

El paso del material se comienza por las mallas con aberturas grandes tabla 10, hasta llegar a las más cerradas tabla 11, de tal manera que los maños mayores se van reteniendo, para obtener la masa retenida por cada malla, y así calcular el porcentaje respecto al total y definir la masa que pasa.

Tabla 10.- Juegos de mallas para grava, recuperada de: (Transportes S. d., Granulometria de Materiales Pétreos para mezclas asfálticas, M·MMP·4·04·002/02 , 2002)

Designación	Aberturamm
2"	50
1½"	37,5
1¼"	31,5
1"	25
¾"	19
½"	12,5
"	9,5
¼"	6,3
N°4	4,75

Tabla 11.- Juegos de mallas para arena con finos, recuperada de: (Transportes S. d., Granulometria de Materiales Pétreos para mezclas asfálticas, M·MMP·4·04·002/02 , 2002)

Designación	Abertura mm
N°10	2
N°20	0,85
N°40	0,425
N°60	0,25
N°100	0,15
N°200	0,075

2.3.2 Partículas alargadas y lajeadas

Esta prueba permite determinar las propiedades artificiales que adquiere el agregado después del proceso de trituración, en específico el contenido de las partículas con forma alargada y lajeada en el material que formara parte de las bases hidráulicas. (Transportes S. d., Partículas Alargadas y Lajeadas, M·MMP·4·01·016/20, 2020)

La prueba radica en separar el retenido de la malla ¼ in (6,3 mm) de una muestra agregados pétreos, para caracterizar la forma de cada partícula, haciendo uso del calibrador de espesor y el calibrador de longitud.

El equipo necesario para ejecutar esta prueba es: juego de mallas, balanza, maquina agitadora para el proceso de cribado, calibrador de espesores, calibrador de espesores, cucharón, charolas, horno.

2.3.3 Equivalente de arena

Esta prueba consiste en establecer el contenido de arenas y arcillas que se encuentran en el agregado fino empleado para las subbases, bases y carpetas asfálticas. (Transportes S. d., Equivalente de Arena de Materiales Pétreos Para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·004/16 , 2016)

La prueba consiste en agitar una probeta, que contiene una muestra reducida de material fino que pasa la malla N°4, mezclada con una solución que permite separar la arena de la arcilla.

El equipo necesario para ejecutar esta prueba es: probeta, tapón de hule, tubo irrigador, botella para solución, soporte o dispositivo de posicionamiento, manguera de hule, pisón, cápsula, embudo de boca ancha, embudo para filtrado, malla #4, papel filtro, balanza, matraces Erlenmeyer, agitador mecánico o manual, guantes de hule, agua, solución de reserva y solución de trabajo.

2.3.5 Desgaste de los Ángeles

Esta prueba tiene por objetivo determinar la resistencia a la trituración de los agregados pétreos empleado en la subbases, bases hidráulicas y carpetas asfálticas.

La prueba consiste en colocar una muestra de agregado dentro de un cilindro giratorio, en donde será sometida al impacto de una carga abrasiva (esferas metálicas) tabla 12, durante un tiempo determinado, para después medir la variación granulométrica de la muestra como la diferencia entre la masa que pasa la malla N°12 (1,7 mm de abertura), antes y después de haber sido sometida a este tratamiento. (Transportes S. d., Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles, M·MMP·4·04·006/02 , 2002)

El equipo necesario para ejecutar esta prueba es: máquina de los ángeles, carga abrasiva (esferas de metal), juego de mallas, horno, balanza, cucharón, charolas y agua.

Tabla 12.- Composición de la muestra de prueba y cargas abrasivas, recuperada de: (Transportes S. d., Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles, M·MMP·4·04·006/02 , 2002)

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción G	Carga abrasiva	
	Mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37,5 - 25	1½" - 1"	1 250 ± 25	12	5 000 ± 25
	25 - 19	1" - ¾"	1 250 ± 25		
	19 - 12,5	¾" - ½"	1 250 ± 10		
	12,5 - 9,5	½" - "	1 250 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
B	19 - 12,5	¾" - ½"	2 500 ± 10	11	4 584 ± 25
	12,5 - 9,5	½" - "	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
C	9,5 - 6,3	" - ¼"	2 500 ± 10	8	3 330 ± 20
	6,3 - 4,75	¼ - N°4	2 500 ± 10		
	Masa total de la muestra de prueba		5 000 ± 10		
D	4,75 - 2	N°4 - N°10	5 000 ± 10	6	2 500 ± 15

2.3.6 Valor de Soporte de California (CBR)

La prueba de Valor de Soporte de California permite conocer resistencia de los materiales a utilizar en la construcción de las capas de subbase y base hidráulica en laboratorio. A través de un ensayo de compactación dinámica bajo condiciones controladas de humedad y densidad. (Transportes S. d., 2023)

El equipo necesario para ejecutar esta prueba es: equipo de carga, gato de carga, marco de carga, anillo de carga, pistón de penetración, prensa universal, moldes, disco espaciador, pisón, base cubica, placas de carga, tanque de saturación, juego de mallas, blanca, charolas, cucharón, probetas, regla, aceite, papel filtro.

2.3.7 Grado de compactación

El grado de compactación consiste en la relación porcentual que entre el material granular compactado respecto al material granular seco (masa volumétrica máxima). Esta última determinada mediante la prueba AASTHO estándar. (Transportes S. d., 2023)

2.3.8 Compactación AASTHO

Esta prueba permite determinar la curva de compactación de los materiales utilizados para terracerías y capas estructurales del pavimento, con base a esta deducir su masa volumétrica seca máxima y el contenido óptimo de agua. (Transportes S. d., 2019)

La prueba consiste en la determinación de diferentes masas volumétricas secas de un material compactado a diferentes contenidos de agua, con la aplicación de una misma energía de compactación en prueba mecánica, grafizando los diferentes puntos correspondientes a cada contenido para así trazar la curva de compactación del material.

2.4 Materiales pétreos para mezclas asfálticas

Son materiales de origen natural producto de trituración, cribados y en su caso lavados, que en combinación con cementantes asfálticos se utilizan para la elaboración de mezclas asfálticas. (Transportes S. d., Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, N·CMT·4·04/17 , 2017)

De acuerdo con el tipo de mezcla a emplear, los agregados pétreos se clasifican de la siguiente manera.

- Materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa;
- Materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría abierta;
- Materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo SMA;

- Materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría discontinua, tipo CASAA
- Materiales pétreos para micro aglomerados
- Materiales pétreos para capas de rodadura por el sistema de riegos.

Para este caso de estudio se extraerán los requisitos de calidad de materiales pétreos para mezclas asfálticas de granulometría densa.

El material pétreo que sea utilizado en la elaboración de mezclas asfálticas de granulometría densa, en caliente o en frío, en función de su tamaño nominal y de la intensidad del tránsito esperado en términos del número de ejes equivalentes (L) de 8,2 toneladas, acumulados durante el periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño, que en ningún caso será menor de 10 años, cumplirá con lo que se indica a continuación:

Cuando el tránsito esperado (L) sea igual a 1 millón de ejes equivalentes o menor, el material pétreo, según su tamaño nominal, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 13 y con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 14.

Tabla 13.- Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa, recuperada de: (Transportes S. d., Materiales Péreos para Mezclas Asfálticas, N-CMT-4-04/17, 2017)

Malla		Tamaño nominal del material pétreo ^[1] mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 ()	12,5 (½)	19 (¾)	25 (1)	37,5 (1½)
Porcentaje que pasa (en masa)						
50	2 in	---	---	---	---	100
37,5	1½ in	---	---	---	100	90 - 100
25	1 in	---	---	100	90 - 100	74 - 90
19	¾ in	---	100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	½ in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	¼ in	70 - 89	56 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	N°4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	N°10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	N°20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	N°40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	N°60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	N°100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	N°200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

[1] El tamaño nominal de un material pétreo es la abertura de la malla con la que se designa el material que cumpla con una determinada granulometría.

Si el tránsito esperado (L) es mayor de 1 millón de ejes equivalentes y hasta 30 millones de ejes equivalentes, el material pétreo según su tamaño nominal cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 13 y con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 15 de la Norma.

Si el tránsito esperado (L) es mayor de 30 millones de ejes equivalentes, el material pétreo, según su tamaño nominal, cumplirá con las características granulométricas que se establecen en la Tabla 13 y con los requisitos de calidad que se indican en la Tabla 15.

Tabla 14.- Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa cuando $L \leq 10^6$, recuperada de: (Transportes S. d., Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, N·CMT·4·04/17, 2017)

Característica ^[1]		Valor
GRAVA		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4
Desgaste de Los Ángeles, %, máximo		35
Desgaste Microdeval, %, máximo		18
Intemperismo acelerado, %, (5 ciclos), máximo ^[2]	En sulfato de sodio	15
	En sulfato de magnesio	20
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo		40
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	90
	Dos o más caras	80
Desprendimiento por fricción, %, máximo		20
ARENA Y FINOS		
Densidad relativa del material pétreo seco (d_{pd}), mínimo		2,4
Angularidad, %, mínimo		40
Equivalente de arena; %, mínimo		45
Azul de metileno, mg/g, máximo		18

[1] El material será 100% producto de trituración de roca sana.

[2] Será suficiente que el intemperismo acelerado cumpla con una de las dos condiciones: en sulfato de sodio o en sulfato de magnesio.

Tabla 15.- Requisitos de calidad del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa cuando $1 \times 10^6 < L \leq 30 \times 10^6$, recuperada de: (Transportes S. d., Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, N·CMT·4·04/17, 2017)

Característica ^[1]		Valor
GRAVA		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4
Desgaste de Los Ángeles, %, máximo		30
Desgaste Microdeval, %, máximo		18
Intemperismo acelerado, %, (5 ciclos), máximo ^[2]	En sulfato de sodio	15
	En sulfato de magnesio	20
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo		40
Partículas trituradas, %, mínimo	Una cara	95
	Dos o más caras	85
Desprendimiento por fricción, %, máximo		20
ARENA Y FINOS		
Densidad relativa del material pétreo seco, mínimo		2,4
Angularidad, %, mínimo		45
Equivalente de arena; %, mínimo		50
Azul de metileno, mg/g, máximo		15

[1] El material será 100% producto de trituración de roca sana.

[2] Será suficiente que el intemperismo acelerado cumpla con una de las dos condiciones: en sulfato de sodio o en sulfato de magnesio.

2.4.1 Densidades relativas y absorción de materiales pétreos

Esta prueba permite determinar las densidades relativas de los agregados pétreos, en otras palabras; la relación masa-volumen respecto a la relación masa-volumen de agua, de igual manera la absorción de los agregados pétreos, puesto que estas propiedades se utilizan para calcular los volúmenes ocupados por los materiales en la mezcla asfáltica; para determinar las densidades relativas estas se dividen en dos pruebas, una para agregado pétreo retenido en la malla N°4 (4.75 mm) y otra para la que pasa dicha malla, Tabla 16 . (Transportes S. d., Densidades Relativas y Absorción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·003/18, 2018)

La determinación de las densidades relativas, así como de la absorción, se hace considerando que, si se representa esquemáticamente una partícula gruesa de material pétreo, parcialmente saturada, formada por sus fases sólida, líquida y gaseosa.

- Densidad relativa del material pétreo seco, es un número indeterminado que representa la relación entre la masa volumétrica del material pétreo seco y la masa volumétrica del agua destilada, ambas a la temperatura y la presión barométrica del lugar, pero en la práctica se emplea el valor de la masa volumétrica del agua, es decir; 1 g/cm^3 ($1\ 000 \text{ kg/m}^3$) a 4°C y una presión de 1 atmósfera
- Densidad relativa del material pétreo saturado y superficialmente seco, es un número indeterminado que representa la relación entre la masa volumétrica del material pétreo saturado, y la masa volumétrica del agua destilada a 4°C , ambas a la temperatura del lugar y a la presión barométrica del lugar, pero en la práctica se emplea el valor de la masa volumétrica del agua, es decir; 1 g/cm^3 ($1\ 000 \text{ kg/m}^3$) a 4°C y una presión de 1 atmósfera
- Densidad relativa aparente del material pétreo, es un número abstracto que representa la relación entre la masa volumétrica de la fase sólida del material pétreo incluyendo los vacíos impermeables y la masa volumétrica del agua destilada a 4°C , ambas a la temperatura del lugar y a la presión barométrica del lugar, pero en la práctica se emplea el valor de la masa volumétrica del agua, es decir; 1 g/cm^3 ($1\ 000 \text{ kg/m}^3$) a 4°C y una presión de 1 atmósfera.

Absorción del material pétreo

Es la masa del agua o líquido que penetra en los vacíos permeables de las partículas, cuando se le deja sumergido en agua a una temperatura de 15 a 25°C , durante 24 h; se expresa en por ciento con relación a la masa de sólidos del material.

Tabla 16.- Tamaño de la porción de prueba del material que se retiene en la malla N°4, recuperada de: (Transportes S. d., Densidades Relativas y Absorción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·003/18, 2018)

Tamaño nominal del material pétreo mm (in)	Tamaño mínimo de la porción prueba de la muestra Kg
37,5 (1½)	5
25 (1)	4
19 (¾)	3
12,5 (½)	2
9,5 ()	2

2.4.2 Intemperismo acelerado de materiales pétreos.

Esta prueba tiene la finalidad de determinar la degradación esperada por el intemperismo de los agregados pétreos para las mezclas asfálticas.

La prueba consiste en someter a continuos ciclos de saturación y secado de los diferentes tamaños de la fracción de agregados gruesos (gravas) de una muestra de materiales pétreos, empleando solución saturada de sulfato de sodio o magnesio, para después medir la diferencia de sus masas antes y después de haber sido sometido a este tratamiento, Tabla 17. (Transportes S. d., Intemperismo Acelerado de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·008/03, 2003)

Tabla 17 Masa de los materiales para la prueba de intemperismo acelerado, recuperada de: (Transportes S. d., Intemperismo Acelerado de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·008/03, 2003)

Tamaño del material (t)		Masa de muestra M_i G
De: (Pasa la malla)	A: (Se retiene en la malla)	
2" (50 mm)	1 ½" (37,5 mm)	1 500
1 ½" (37,5 mm)	1" (25 mm)	1 500
1" (25 mm)	¾" (19 mm)	1 000
¾" (19 mm)	½" (12,5 mm)	500
½" (12,5 mm)	Nº 4 (4,76 mm)	300

2.4.3 Desprendimiento por fricción en materiales pétreos para mezclas asfálticas.

Esta prueba busca determinar la pérdida de la película asfáltica en los agregados pétreos.

La prueba consiste en inducir a la acción del agua y a continuos ciclos de agitación dentro de un frasco de vidrio, varias muestras de mezcla asfáltica de granulometría definida, para después evaluar el estado físico una vez terminado los ciclos de este tratamiento. (Transportes S. d., Desprendimiento por Fricción en Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·009/03, 2003)

2.4.4 Partículas trituradas de materiales pétreos para mezclas asfálticas

Esta prueba permite establecer el contenido de partículas producto de la trituración presentes en los agregados pétreos, retenidos en la malla N°4 (4,75 mm), para mezclas asfálticas, Tabla 18. (Transportes S. d., Partículas Trituradas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·013/09, 2009)

La prueba consiste en agrupar las partículas con una y con dos o más caras fracturadas para conocer su porcentaje respecto a la masa total de las partículas retenidas.

Tabla 18 .- *Masa mínima necesaria de cada porción de prueba para la determinación del porcentaje de partículas trituradas de una muestra de grava, recuperada de: (Transportes S. d., Partículas Alargadas y Lajeadas, M·MMP·4·01·016/20, 2020)*

Tamaño nominal del material mm (in)	Masa mínima de la porción de prueba g
9,5 ()	200
12,5 (½)	500
19,0 (¾)	1 500
25,0 (1) o mayor	3 000

2.4.5 Azul de metileno de materiales pétreos para mezclas asfálticas

Esta prueba consiste en estimar el grado de reactividad de los materiales finos, con partículas menores de 0,075 mm (malla N°200), que se encuentran en los agregados pétreos para mezclas asfálticas.

La prueba consiste en añadir a los finos gotas controladas de azul de metileno, hasta que la tonalidad de del azul de metileno disminuya. Mientras más puntos de azul de metileno retengan los finos, serán más activos, lo cual proporciona un índice indirecto de su potencialidad expansiva. (Transportes S. d., Azul de Metileno de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·014/09, 2009)

2.4.6 Pulimento acelerado

Esta prueba permite determinar la susceptibilidad al pulimento de los agregados pétreos para mezclas asfálticas, debido a la acción del tránsito.

El pulimento se define como la pérdida de microtextura de la superficie de los agregados pétreos de mezclas asfálticas que están expuestos en la superficie de rodadura al tránsito de una carretera. (Transportes S. d., Pulimento Acelerado, M·MMP·4·04·016/21, 2021).

2.5 Ejes equivalentes

El eje estándar, de acuerdo con la definición de la AASHTO, se comprende como aquel integrado por un arreglo de ruedas sencillo (dos neumáticos contiguos en cada extremo), que transmite a la superficie del pavimento una descarga total de 8.2 t (18,000 lb), cuando la presión de inflado del neumático sea 5.8 Kg/ cm² (83 lb/pug²), ilustración 10.

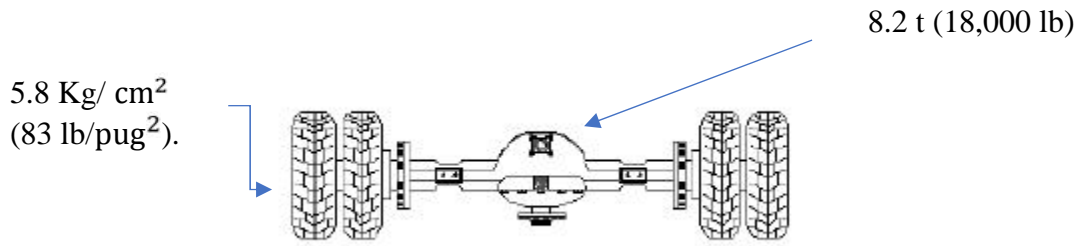


Ilustración 10.- Cargas transmitidas al pavimento, recuperada de: (Gutierrez, 2022)

Con la finalidad de unificar las cargas y presiones de inflado reales del tránsito en una carretera determinada, que se constituye por una variedad de vehículos con diferente configuración de ruedas, ilustración 11, AASHTO aportó el concepto de Tránsito Equivalente (L), como el número de aplicaciones acumuladas en un eje estándar, que produce el mismo “daño” que el tránsito real de la carretera a estudiar, para un cierto periodo de análisis.

Tránsito mezclado real **Número de ejes estándar que producen el mismo daño**

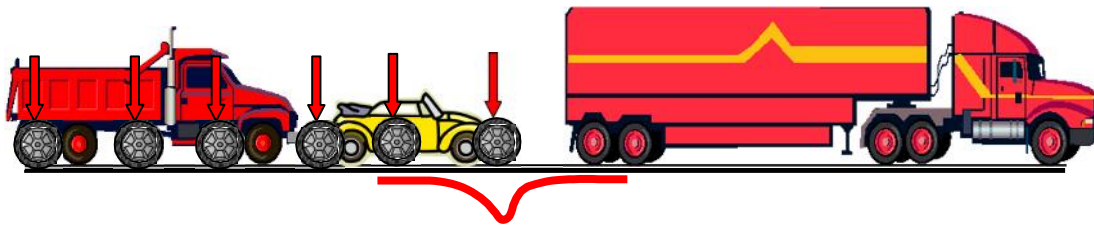


Ilustración 11.- tránsito equivalente, recuperada de: (Gutierrez, 2022)

2.6 Coeficiente de daño

El instituto de ingeniería de la UNAM (1981), haciendo uso de la Teoría de Boussinesq que reconoce un medio homogéneo, isótropo, semi-infinito y linealmente elástico, iguala los esfuerzos normalmente verticales que producen los dos arreglos de las ruedas, el del eje estándar (eq) y del vehículo real (i), para una profundidad en específico z y da por sentado que en ese momento se produce el mismo daño en ambos casos. De esta manera, el Instituto de Ingeniería propone el siguiente modelo matemático experimental, ecuación 16.

$$\log K_{di} = \frac{\log \sigma_{zi} - \log \sigma_{zeq}}{\log a}$$

Ecuación 16, *Teoría de Boussinesq, recuperada de: (Gutierrez, 2022)*

En donde los esfuerzos normales verticales s_z , del eje i y del eje estándar eq se calculan de acuerdo con la Teoría de Boussinesq y $A = 1.5$, es la constante experimental obtenida por el Instituto de Ingeniería en sus pruebas, ecuación 17.

Entonces:

$$\sigma_{zi} = P_c \left[1 - \frac{Z^3}{(r_{ci} + Z^2)^{1.5}} \right]$$

Ecuación 17, *Constante experimental por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, recuperada de: (Gutierrez, 2022)*

Para ejes estándar sustituyendo en la ecuación 17:

$$\sigma_{zeq} = 5.8 \left[1 - \frac{Z^3}{(15^2 + Z^2)^{1.5}} \right]$$

Considerando a $P(t)$ como la carga total en toneladas del conjunto en los tres tipos comunes de ejes (sencillo, tándem y trídem), el radio de contacto de cada uno de ellos se puede calcular con:

Ejes sencillos, ecuación 18:

$$r_1 = \frac{1000 P}{2 * \pi * p_c}$$

Ecuación 18, *Radio de contacto de eje sencillo, recuperada de: (Gutierrez, 2022)*

Para ejes tándem, ecuación 19:

$$r_2 = \frac{1111 P}{4 * \pi * p_c}$$

Ecuación 19, *Radio de contacto de eje tándem, recuperada de:* (Gutierrez, 2022)

Para ejes trídem, ecuación 20:

$$r_3 = \frac{1333 P}{6 * \pi * p_c}$$

Ecuación 20, *Radio de contacto de eje trídem, recuperada de:* (Gutierrez, 2022)

El Instituto de Ingeniería de la UNAM recomienda que para profundidades de 30 cm considerar los conjuntos tándem y trídem como compuestos por dos o tres ejes sencillos, respectivamente, siendo el daño del eje en conjunto, la suma de los daños de dichos ejes independientes.

Los coeficientes de daños (Kd), a la profundidad (z) considerada, se entiende en la intersección de las gráficas de distribución, de esfuerzos (Boussinesq) del conjunto (i) considerado y las curvas de igual daño relativo.

2.7 Factores direccionales y por carril

Para caracterizar cualitativamente una vialidad y así determinar los factores de carril y sentidos en proyectos de diseño de pavimentos, rehabilitación o manteniendo se utilizan las siguientes ilustraciones que simplifican el proceso.

Para el caso donde se analice una vialidad de dos sentidos y un carril para cada uno de ellos, los factores serán como se muestra en la ilustración 12:

Factor carril	Factor Sentido
1	0.5

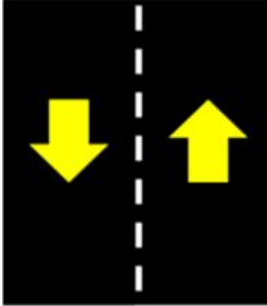


Ilustración 12.- *Dos sentidos, un carril por sentido, recuperada de: (Gutierrez, 2022)*

Para el caso donde se analice una vialidad de un sentido y dos carriles, los factores serán como se muestra en la ilustración 13:

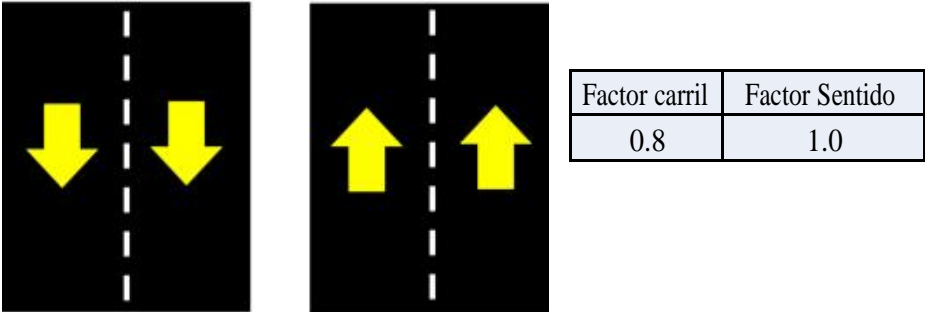


Ilustración 13.- *Un sentido, dos carriles por sentido, recuperada de: (Gutierrez, 2022)*

Para el caso donde se analice una vialidad de un sentido y tres carriles, los factores serán como se muestra en la ilustración 14:

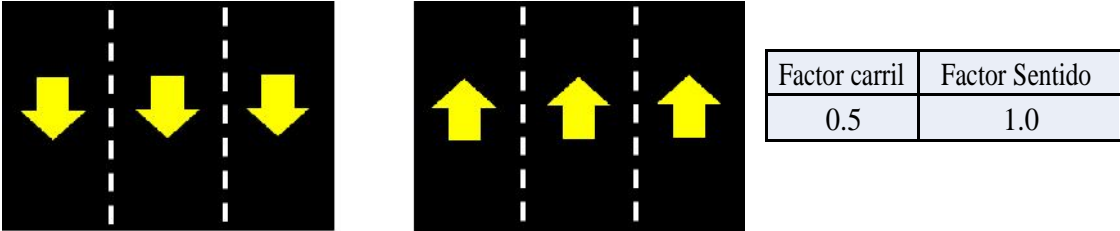


Ilustración 14.- *Un sentido, tres carriles por sentido, recuperada de: (Gutierrez, 2022)*

2.8 Equivalent Single Axle Load (ESAL's)

2.8.1 Cálculo de Equivalent Single Axle Load (ESAL's)

$$ESALS = (TPDA)(C_D)(T_0)(CAT)$$

Ecuación 21, *Cálculo de Equivalent Single Axle Load (ESAL's)*, recuperada de: (Gutierrez, 2022)

ESALS = Número de aplicaciones de carga del eje estándar de 8.2 t, producidas por p tipo de vehículos durante n años, ecuación 21.

TDPA= Tránsito Diario Promedio Anual, en el año inicial de operación

CD = Coeficiente de distribución del tránsito. Se refiere al porcentaje de vehículos que circulan en el carril de proyecto

T_0 = Numero de aplicaciones de carga del eje estándar, durante el primer año de servicio de la carretera, ecuación 22.

$$T_0 = \frac{P}{j=1} C_j (W_j) d_c + (1 - W_j) d_v$$

Ecuación 22, *Calculo de numero de aplicaciones de carga del eje estándar*, recuperada de: (Gutierrez, 2022)

C_j = Proporción de cada tipo de vehículo, j.

W_j = Proporción de vehículos cargados por cada tipo de vehículo, j.

d_c = Coeficiente de daño del vehículo tipo j, cargado.

d_v = Coeficiente de daño del vehículo tipo j, vacío.

CAT= Coeficiente de acumulación del tránsito, ecuación 23, al cabo de n años de operación.

$$CAT = 365 \frac{1 + i - 1}{i}$$

Ecuación 23, *Calculo del coeficiente de acumulación del tránsito, recuperada de:*
(Gutierrez, 2022)

i= tasa de crecimiento promedio anual, del tránsito vehicular

n= número de años de operación de la carretera.

CAPITULO III ACTIALIZACIÓN DE DATOS VIALES

3.1 Datos del Proyecto Quetzalcóatl

Los datos completos del aforo vehicular para el proyecto se presentan en el anexo (mencionar anexo).

A continuación, se presenta el resumen del análisis de los aforos, este es un extracto del documento PROYECTO Quetzalcóatl, desarrollado por GEOTECNIA Y DESARROLLO DE INFRAESTRUCTURA S.A. DE C.V. en conjunto con LABORAOROTIO DE INGENIRIA S.A. DE C.V., en el 2014.

Datos de campo

Se llevó a cabo el aforo del tránsito vehicular con clasificación a la altura del puente peatonal de las instalaciones del SAT como se muestra en la ilustración 15, punto considerado como adecuado en esta Vía para aforar el volumen vehicular, porque es el sitio donde se colocaron las cámaras del programa de foto multa que tiene implementado el gobierno del estado con mucho éxito para reducir las velocidades vehiculares. El aforo se realizó con personal estratégicamente ubicado en cada sentido de circulación durante un lapso de tres días seguidos, que comprende el periodo del jueves 10 al sábado 12 enero de 2015 con una duración de 12 horas que comprende de las 7.00 AM a las 19.00 PM. Este estudio se complementó con el aforo publicado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en su libro de datos viales en su kilómetro 0.0 y 12.0 para los años 2009 al 2013, de acuerdo a la ubicación mostrada en el croquis siguiente:

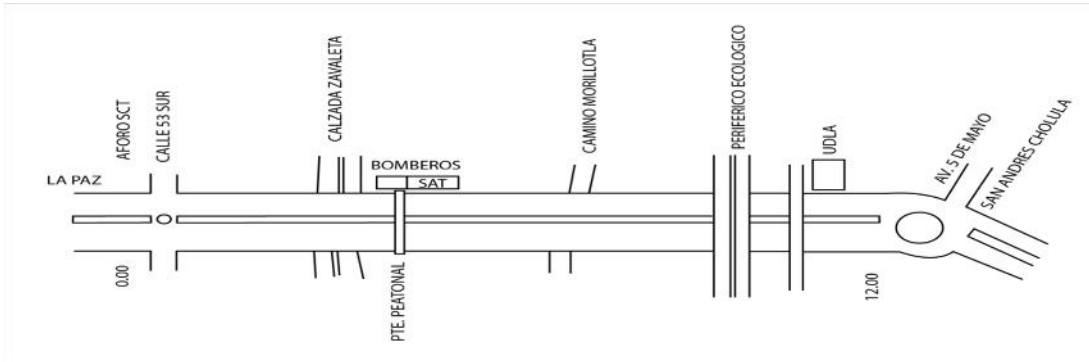


Ilustración 15, Zona de aforo, recuperada de (C.V, 2014)

Estación 1.- Ambos sentidos de circulación de la salida de la cd de Puebla 0.0 de la vía Quetzalcóatl

Estación 2.- Paso peatonal que cruza la vía Quetzalcóatl y da acceso a las instalaciones del SAT y a la estación de bomberos.

Estación 3.- Ambos sentidos de circulación de la entrada a la cd de San Andrés Cholula 12.0 de la vía Quetzalcóatl

TPDA para volúmenes SCT

Aplicando los volúmenes publicados en los libros de “Datos Viales” que edita la SCT para la vía Quetzalcóatl Cholula -Puebla y el entronque a San Andrés Cholula para los años del 2009 al 2013, tanto para el tramo Av. Teziutlán– Av. Zavaleta como el de Av. Zavaleta- Entronque San Andrés Cholula, pero siempre considerando el comportamiento del volumen del tránsito obtenido como estación de correlación con los trabajos de campo en el acceso al SAT y la estación de bomberos, sitios donde se colocó el personal para la realización del estudio de aforo manual con clasificación vehicular y con el cual se determinó el tránsito promedio anual (TPDA).

TASA DE CRECIMIENTO (i)

Este valor se obtuvo aplicando el TPDA publicado en los libros de datos viales SCT para los años 2009 al 2013 para ambos sentidos de circulación, por el método de mínimos cuadrados que es una tendencia lineal y curva que puede ser determinada matemáticamente. Se substituyen los valores obtenidos en las ecuaciones y se despeja “a” y “b”.

$$Y = Na + Xb$$

$$XY = Xa + (X^2)b$$

Usando la ecuación de la línea recta se substituyen los valores encontrados para “a” y “b” y se encuentran los valores de “Y” para valores sucesivos de “X” colocándolos en la tabla. Esto forma una línea recta de cuadrados mínimos y constituirá la línea de tendencia, como se observa en las ilustraciones 16 y 17.

La determinación de la tasa de incremento anual (i) es igual a $i = \frac{N(a_1)}{Y - (a_1)(X)}$

VIA QUETZALCOATL KM 0.0 PUEBLA													
			Ao		18786				Ao	18010			
			A1		1795				A1	2046			
			i (Tasa)		0.096				i (Tasa)	0.114			
SENTIDO 1					V	36733	SENTIDO 2					V	38474
AÑO	No. DATOS	A	TDPA V	A2	A x V	AÑO	No. DATOS	A	TDPA V	A2	A x V		
2009	1	0	18927	0	0	2009	1	0	17925	0	0		
2010	2	1	20436	1	20436	2010	2	1	20106	1	20106		
2011	3	2	22127	4	44254	2011	3	2	22184	4	44368		
2012	4	3	24539	9	73617	2012	4	3	24174	9	72522		
2013	5	4	25849	16	103396	2013	5	4	26123	16	104492		
SUMA		10	111878	30	241703	SUMA		10	110512	30	241488		
		100						100					

Ilustración 16, TDPA de SCT con Tasa de Crecimiento por Método de Mínimos Cuadrados, Puebla, recuperada de: (C.V, 2014)

VIA QUETZALCOATL KM 12.0 CHOLULA													
			Ao		15884				Ao	15529			
			A1		1729				A1	2192			
			i (Tasa)		0.109				i (Tasa)	0.141			
SENTIDO 1					V	33176	SENTIDO 2					V	37451
AÑO	No. DATOS	A	TDPA V	A2	A x V	AÑO	No. DATOS	A	TDPA V	A2	A x V		
2009	1	0	12668	0	0	2009	1	0	12753	0	0		
2010	2	1	13014	1	13014	2010	2	1	13270	1	13270		
2011	3	2	13357	4	26714	2011	3	2	13994	4	27988		
2012	4	3	13670	9	41010	2012	4	3	14322	9	42966		
2013	5	4	17967	16	71868	2013	5	4	18146	16	72584		
SUMA		10	70676	30	152606	SUMA		10	72485	30	156808		
		100						100					

Ilustración 17, TDPA de SCT con Tasa de Crecimiento por Método de Mínimos Cuadrados, Cholula, recuperada de: (C.V, 2014)

Promediando las tasas de crecimiento de los últimos cinco años en la recta a Cholula, se obtuvo el valor recomendado para obtener el horizonte de proyecto a 15, ilustración 18.

CIRCULAC	TASA i	TASA i	PROMEDIO
SENT 1	0.096	0.109	0.10
SENT 2	0.114	0.141	0.13

Ilustración 18, Tasa de crecimiento, recuperada de: (C.V, 2014)

Resumen De Procedimiento

De la misma manera en la siguiente tablas 19, 20, 21 y 22 se muestra el resumen de las estaciones aforadoras colocadas para cada día de aforo, al que se le aplico el procedimiento arriba indicado para determinar el TPDA y su clasificación vehicular, considerándoles en su cálculo los factores para las horas faltantes del día de acuerdo a la teoría de horas pico y horas valle, así como el cálculo del factor para las horas nocturnas.

Tabla 19, Resumen Estación SAT Puebla-Cholula: Calculo Del TPDA, recuperada de: (C.V, 2014)

QUETZALCOATL SAT SENTIDO PUEBLA-CHOLULA								
	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2-R4	TOTAL
DIA 1	25061	390	88	47	2	0	0	25588
DIA 2	25497	378	77	51	2	2	1	26008
DIA 3	21682	342	86	61	1	4	0	22176
TOTAL	72240	1110	251	159	5	6	1	73772
PROMEDIO	24080	370	84	53	2	2	0	24591
%	97.92%	1.50%	0.34%	0.22%	0.01%	0.01%	0.00%	100.00%

Tabla 20, TPDA, recuperada de: (C.V, 2014)

20:00	1947
21:00	1537
22:00	922
07:00 A 22:00	28996
VOL. NOCT	3480
TDPA1	32476
	389713
	11691387
TDPAFINAL	32031

Tabla 21, Resumen Estación SAT Cholula Puebla: Calculo Del TPDA, recuperada de: (C.V, 2014)

QUETZALCOATL SAT SENTIDO CHOLULA-PUEBLA								
	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2-R4	TOTAL
DIA 1	30005	281	154	35	2	4	2	30483
DIA 2	29320	225	123	37	3	5	2	29715
DIA 3	21783	268	160	49	0	2	0	22262
TOTAL	81108	774	437	121	5	11	4	82460
PROMEDIO	27036	258	146	40	2	4	1	27487
%	98.36%	0.94%	0.53%	0.15%	0.01%	0.01%	0.00%	100.00%

Tabla 22, TPDA, recuperada de: (C.V, 2014)

20:00	2176
21:00	1718
22:00	1031
07:00 A 22:00	32411
VOL. NOCT	3889
TDPA	36301
	435609
	13068261
TDPAFINAL	35803

Es conveniente dejar asentado que los procedimientos para calcular los parámetros de funcionamiento, basados en las características, volúmenes de tránsito específicos y las relaciones entre el volumen y el funcionamiento, están expuestas a la variación de hábitos de los conductores locales y otros factores; de este modo, los cálculos de operación nunca duplicarán exactamente los valores obtenidos en el campo.

La clasificación vehicular promedio mostrada en la siguiente tabla 23, es la que se aplicaría a lo largo del tramo en caso de así requerirse un diseño de espesores del pavimento homogéneo para todo el tramo

Tabla 23, Resumen Clasificación, recuperada de: (C.V, 2014)

A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2-R4	TOTAL
97.923%	1.505%	0.340%	0.216%	0.007%	0.008%	0.001%	100%
98.360%	0.939%	0.530%	0.147%	0.006%	0.013%	0.005%	100%
98.142%	1.222%	0.435%	0.181%	0.006%	0.011%	0.003%	100%

AJUSTE DE VOLÚMENES DE TRÁNSITO.

En la mayoría de las vialidades, no siempre se dispone de toda la información de volúmenes a través de periodos largos, por ejemplo, años; sin embargo, en este caso si se contó con esa información que permitió determinar factores de expansión y ajuste aplicables.

Lo más comúnmente usado es transformar un aforo de 24 horas de un día y mes específico, volumen de tránsito diario TD, a volumen tránsito promedio diario TDP, lo cual se consigue mediante la siguiente ecuación 24:

$$TPD = TD, (F_m)(F_d)$$

Ecuación 24, Transito promedio diario, recuperada de: (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Donde:

F_m = Factor de ajuste mensual

F_d = Factor de Ajuste diario

En la tabla 24 siguiente se muestra el resultado del aforo con clasificación para las tres estaciones de aforo donde se muestra el TPDA para el año 2014.

Tabla 24, Resultado del aforo con clasificación para las tres estaciones de aforo, recuperada de: (C.V, 2014)

TDPA	AÑO 2013	AÑO 2013	AÑO 2013 X i	AFORO ZAV 2014	AFORO 2014
SENTIDO	ACCESO PUE	ACCESO CHOL	DATOS VIALES		TDPA
PUE-CHOL	25849	26123	29518	-	29518
CHOL-PUE	23054	25190	28716	-	28716
ZAVAL-CHOL	-	-	-	32031	32031
CHOL-ZAVAL	-	-	-	35803	35803

Como se puede apreciar el volumen vehicular en el tramo de Zavaleta hacia el camino a Morillotla es mayor que en el inicio y final de la vía Quetzalcóatl.

En la tabla 25 siguiente se muestran los resultados obtenidos de acuerdo con el estudio de campo para la Vía Quetzalcóatl. El mayor TDPA para el año 2014 fue de 35803 vehículos mezclados obtenido a la altura del Boulevard Zavaleta en el sentido Cholula-Puebla.

Estos valores se deberán aplicar en el diseño de la estructura del pavimento, a la que se le deberá aplicar la tasa de crecimiento calculada que es del 10.0 % para el horizonte de proyecto requerido.

Por lo anterior, el valor recomendado para el diseño del pavimento de la Vía Quetzalcóatl en el año 2014, es de 35803 vehículos como TDPA con la tasa de crecimiento de 10.0% y la clasificación vehicular siguiente:

Tabla 25, CLASIFICACION VEHICULAR TRAMO, recuperada de: (C.V, 2014)

TIPO	DEFINICION	%
A	AUTOMOVIL LIGERO	98.14%
B	AUTOBUS PASAJEROS	1.20%
C2	CAMION CARGA 2 EJES	0.43%
C3	CAMION CARGA 3 EJES	0.18%
T3S2	CAMION CARGA TRACTOR 3 EJES SEMIREMOLQUE 2 EJES	0.006%
T3S3	CAMION CARGA TRACTOR 3 EJES SEMIREMOLQUE 3 EJES	0.011%
T3S3R4	CAMION CARGA TRACTOR 3 EJES SEMIREMOLQUE 3 EJES Y REMOLQUE DE 4 EJES	0.003%

Croquis , ilustración 19, donde se muestra el TPDA por sentido de circulación y el obtenido para ambos tramos y sentidos de circulación.

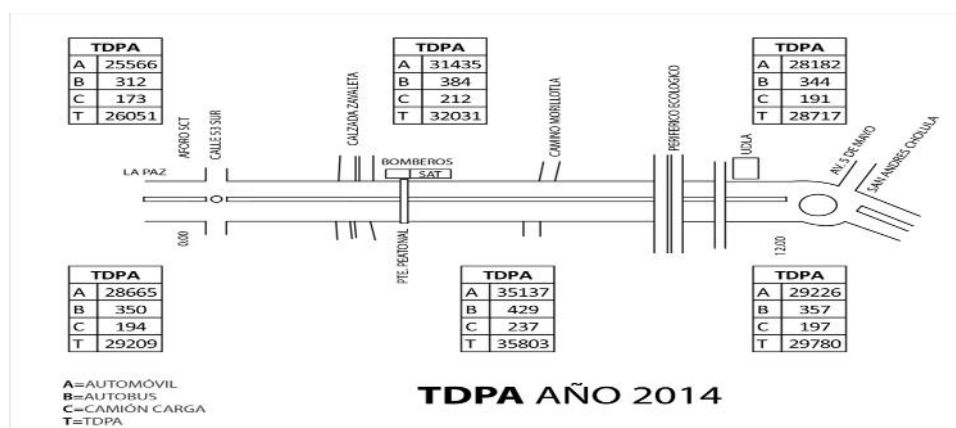


Ilustración 19, TPDA por sentido de circulación, recuperada de: (C.V, 2014)

3.2 Análisis de los resultados del Proyecto Quetzalcóatl

Con la revisión realizada a los resultados de ingeniería de tránsito del “PROYECTO QUETZALCOÁTL” mismos que están sujetos a los alcances del presente documento, a continuación, se mencionan las observaciones al proceso de recolección de datos y al cálculo de la tasa de crecimiento.

- El periodo de recolección de datos de aforo fue muy corto por lo que el factor de tránsito diario tiene poca confiabilidad para efectos del cálculo de tránsito promedio diario anual (TPDA).
- En seguimiento al proceso de cálculo de la tasa de crecimiento, el resultado obtenido tiene poca similitud con respecto a los volúmenes actuales, en el desarrollo del proyecto Quetzalcóatl se plantea que la vida útil del pavimento sea de 15 años, transcurridos nueve años desde los estudios de tránsito se puede concluir que la proyección es errónea, puesto que la propuesta de superficie de rodadura esta sobre estimada para el TPDA de la zona.
- Por último, se tiene poca claridad con la interpretación de la tasa de crecimiento dado que no especifica si esta es proyectada para el final de la vida útil de la propuesta de pavimento o es la tasa de crecimiento de año con año.

Con base a lo antes mencionado se procede a recalcular los datos obtenidos, actualizándolos con la finalidad de replantear la tasa de crecimiento y comprobar o descartar las hipótesis planteadas.

Además de tener el sustento para la comparación de los ESAL's con los resultados obtenidos.

3.3 ACTUALIZACIÓN DE DATOS VIALES

3.3.1 Ajuste del tránsito diario

Dadas las características del municipio de San Andrés Cholula población que se conecta con la Ciudad de Puebla a través de la Vía Quetzalcóatl y teniendo el concentrado de resultados del aforos realizados durante los tres días de estudio como se muestra en la tabla 26, se opta por hacer el uso del método de regresión lineal para hacer el cálculo y estimar el tránsito diario de los días faltantes de la zona de estudio, puesto que los días de aforo son correspondientes al tránsito normal de la zona, ya que el tránsito atípico se presenta durante el fin de semana por el atractivo turístico que tiene San Andrés Cholula.

Tabla 26, Resumen de Aforo Proyecto Quetzalcóatl, recuperada de: (C.V, 2014)

RESUMEN DE AFORO			
X	DIA	SENTIDO	
		PUEBLA CHOLULA	CHOLULA - PUEBLA
1	DOMINGO	VALORES PARA ESTIMAR	VALORES PARA ESTIMAR
2	LUNES		
3	MARTES		
4	MIÉRCOLES		
5	JUEVES	25588	30483
6	VIERNES	26008	29715
7	SÁBADO	22176	22262

En la siguiente tabla 27 se muestran el proceso calculo para los valores que se utilizaran para la fórmula de la regresión lineal

Tabla 27, *CALCULO POR EL METODO DE LA REGRESIÓN LINEAL SENTIDO PUEBLA -CHOLULA, CHOLULA - PUEBLA*

CALCULO POR EL METODO DE LA REGRESIÓN LINEAL PARA EL SENTIDO PUEBLA -CHOLULA					
DIAS DE AFORO	Y	X	X^2	X*Y	Y^2
JUEVES	25588	1	1	25588	654745744
VIERNES	26008	2	4	52016	676416064
SABADO	22176	3	9	66528	491774976
SUMATORIAS	73772	6	14	144132	1822936784

CALCULO POR EL METODO DE LA REGRESIÓN LINEAL PARA EL SENTIDO CHOLULA – PUEBLA					
DIAS DE AFORO	Y	X	X^2	X*Y	Y^2
JUEVES	30483	1	1	30483	929213289
VIERNES	29715	2	4	59430	882981225
SABADO	22262	3	9	66786	495596644
SUMATORIAS	82460	6	14	156699	2307791158

Conociendo la ecuación 12 de la regresión lineal:

$$= a*x+b$$

Ecuación 12, *Regresión lineal, recuperada de:* (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Se procede a calcular los valores para a y b0 de la siguiente manera.

$$SC(XY)=\sum X * Y - \frac{\sum X * \sum Y}{N}$$

Ecuación 25, *Calculo de intersección dependiente*

$$SC(X)=\sum X^2 - \frac{\sum X^2}{n}$$

Ecuación 26, *Calculo de intersección independiente*

Donde lo SC(XY) y SC(X) son los valores de intersección.

Una vez calculados valores de intersección sustituyen en las siguientes ecuaciones 27 y 28:

$$a = \frac{SC(xy)}{SC(x)}$$

Ecuación 27, Cálculo de variable dependiente

$$b = \frac{\sum y - (b1 * \sum x)}{n}$$

Ecuación 28, Cálculo de variable independiente

Sustituyendo en las ecuaciones 25, 26, 27 y 28 con los valores obtenidos en las anteriores tablas:

Sentido Puebla - Cholula:

Ecuación 25

$$SC(XY) = 144132 - \frac{6 * 73772}{3} = -3412$$

Ecuación 26

$$SC(X) = 14 - \frac{6^2}{3} = 2$$

Ecuación 27

$$a = \frac{-3412}{2} = -1706$$

Ecuación 28

$$b = \frac{73772 - (-1706 * 6)}{3} = 28002.667$$

Por lo tanto, para el sentido Puebla - Cholula es la ecuación 29:

$$Y = -1706(x) + 28002.667$$

Ecuación 29, *Ecuación para estimación de tránsito diario Puebla - Cholula*

Sustituyendo en las ecuaciones 25, 26, 27 y 28 con los valores obtenidos en las anteriores tablas:

Sentido Cholula - Puebla:

Ecuación 25

$$SC(XY)=156699 - \frac{6 \cdot 82460}{3} = -8221$$

Ecuación 26

$$SC(X)=14 - \frac{6^2}{3} = 2$$

Ecuación 27

$$a = \frac{-8221}{2} = -4110.5$$

Ecuación 28

$$b = \frac{82460 - (-4110.5 \cdot 6)}{3} = 35707.667$$

Por lo tanto, para el sentido Cholula - Puebla es la ecuación 30:

$$Y = -4110.5(x) + 35707.667$$

Ecuación 30, *Ecuación para estimación de tránsito diario Cholula- Puebla*

Utilizando las ecuaciones encontradas, a continuación, se muestra la tabla 28 de cálculos para la estimación del tránsito diario de los días no aforados.

Tabla 28, Cálculo de Transito Diario

CALCULO DE TRANSITO DIARIO				
X	DIA	Formula = -1706 (x)+28002.667	Formula = -4110 (x)+ 35707.667	TRANSITO COMBINADO
		PUEBLA - CHOLULA	CHOLULA – PUEBLA	
1	DOMINGO	26297	26296	52593
2	LUNES	24591	24590	49180
3	MARTES	22885	22883	45768
4	MIÉRCOLES	21179	21177	42355
5	JUEVES	25588	30483	56071
6	VIERNES	26008	29715	55723
7	SÁBADO	22176	22262	44438
			TOTAL=	346128

Teniendo los tránsitos diarios de la semana completa se continua con el cálculo del tránsito promedio diario semanal, sustituyendo en la ecuación 5:

$$TPDS = \frac{DIAS\ DE\ LA\ SEMANA}{7} = \frac{346128}{7}$$

Ecuación 5, *Calculo de TPDS, recuperada de:* (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

$$TPDS = 49447 \text{ Vehículos Mixtos}$$

3.3.2 Ajuste de tránsito promedio diario anual

Sustituyendo para este caso de estudio, se hace la sustitución en las fórmulas anteriormente descritas en el capítulo 1, por lo tanto:

Determinación de desviación estándar muestral Ecuación 10:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (TD_i - TPDS)^2}{n-1}}$$

Ecuación 10, *Desviación estándar muestral, recuperada de:* (G., 2016)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (55723 - 49447)^2}{7-1}} \quad S = 2562$$

Determinación de la desviación estándar:

$$\hat{\sigma} = \frac{S}{\sqrt{n}} \left(\sqrt{\frac{N-n}{N-1}} \right)$$

Ecuación 9, *Desviación estándar, recuperada de:* (G., 2016)

$$\hat{\sigma} = \frac{2562}{\sqrt{7}} \left(\sqrt{\frac{365-7}{365-1}} \right) \quad \hat{\sigma} = 960$$

Para la elección del factor de confiabilidad K ilustración 6, se propone tomar un 95% de confiabilidad, sustentado en el proceso de cálculo de los días faltantes por aforar, teniendo

así una muestra más grande del tránsito diario, por lo que haciendo uso de la tabla de factores se determinar que el valor correspondiente es 1.96.

Ilustración 6,

Constante K	Nivel de Confiabilidad (%)
1.00	68.3
1.50	89.6
1.64	90.0
1.96	95.0
2.00	95.5
2.50	98.8
2.58	99.0
3.00	99.7

Ilustración 20 Nivel de confiabilidad, fuente: (Rafael Cal y Mayor R., 2016)

$$K = 1.96$$

Determinación del valor de confianza, ecuación 7:

$$A = K * E$$

Ecuación 7, Valor de confianza, recuperada de: (G., 2016)

$$A = 960 * 1.96$$

$$A = 1882$$

Por lo tanto, se determina de acuerdo con la ecuación 11 que el valor correcto para el Tránsito Promedio Diario Anual del Proyecto Quetzalcóatl es:

$$TPDA = 49447 \pm 1882 \text{ veh/día}$$

A continuación, se hace la comparación entre los TPDA obtenidos en el proceso de ajuste en este trabajo, tabla 29, el utilizado por el Proyecto Quetzalcóatl y el publicado en el portal de datos viales de la SICT.

Tabla 29, Comparación de TPDA

TPDA COMBINADO VIA QUETZALCOÁTL 2014 veh/día		
PROYECTO QUETZALCOATL	AJUSTE HECHO PARA ESTE TRABAJO	PUBLICADO POR DATOS VIALES SICT
35 803	49 447 + 1882	49 896

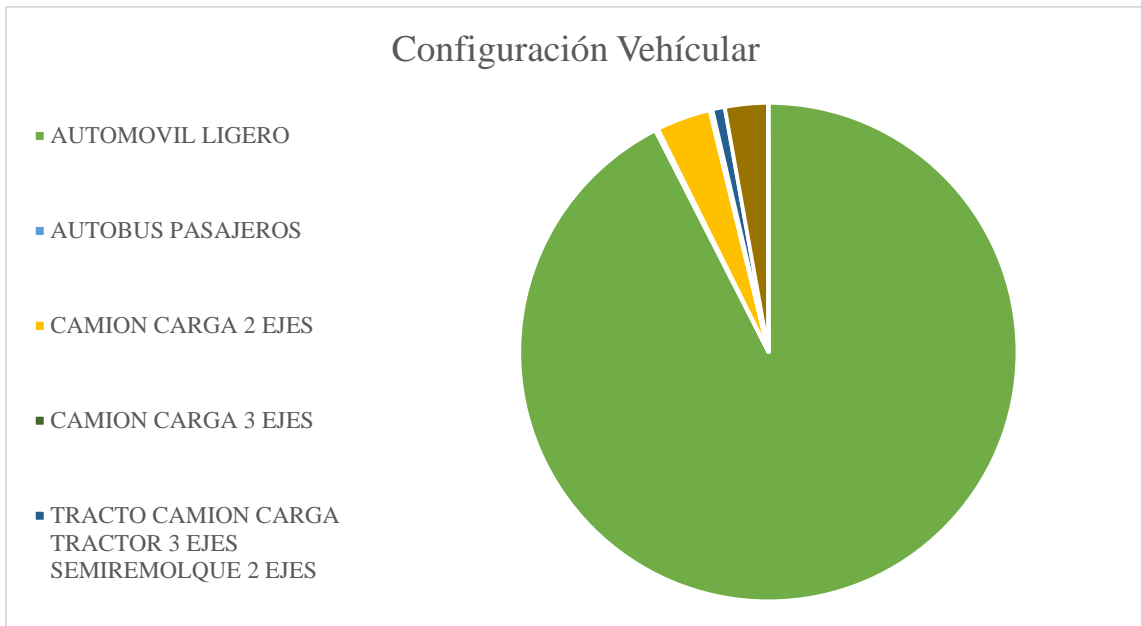
Obteniendo así la configuración vehicular ajustada tabla 30, teniendo como base las configuraciones vehiculares históricas publicadas por la SICT en el portal de datos viales.

Tabla 30 CONFIGURACIÓN VEHÍCULAR AJUSTADA DE LA VÍA QUETZALCÓATL PARA 2014

CONFIGURACIÓN VEHÍCULAR DE LA VÍA QUETZALCÓATL PARA 2014			
CLASIFICACIÓN VEHÍCULAR	REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA	DEFINICIÓN	%
A		AUTOMOVIL LIGERO	92%
B		AUTOBUS DE PASAJEROS	1%
C2		CAMION DE CARGA 2 EJES	4%
C3		CAMION DE CARGA 3 EJES	0%
T3S2		TRACTO CAMION DE CARGA 3 EJES SEMIREMOLQUE 2 EJES	1%
T3S3		TRACTOCAMION CARGA TRACTOR 3 EJES SEMIREMOLQUE 3 EJES	2%
T3S2R4		TRACTO CAMION DE TRES EJES CON SEMIREMOLQUE 2 EJES Y REMOLQUE DE 4 EJES	0%

En la siguiente grafica 1 se hace la representación esquemática de la configuración vehicular, esto con la finalidad de facilitar la interpretación de los datos.

GRAFICA 1, CONFIGURACIÓN VEHÍCULAR



Como se observa la Vía Quetzalcóatl se caracteriza por un mayor tránsito de vehículos ligeros, la razón es porque esta vía es de conexión rápida entre los municipios de H. Puebla de Zaragoza y San Andrés Cholula.

Observaciones

Realizando el análisis de las diferencias entre los TPDA se concluye lo siguiente:

- El TPDA obtenido para el Proyecto Quetzalcóatl está subestimado, esto implica calcular erróneamente la tasa de crecimiento, teniendo como principal afectación que la propuesta de pavimento no sea duradera y el diseño del mismo falle antes de lo proyectado.
- Realizado el ajuste con la estimación del tránsito diario, para así encontrar el tránsito promedio diario semanal (TPDS) se determina que el proceso de cálculo de la relación entre el TPDS y el TPDA fue correcto, esto último comprobándolo con los datos publicados por el portal de datos viales para el 2014.

3.3.3 Ajuste de volúmenes futuros

En seguimiento al ajuste de los datos viales se procede a calcular la tasa de crecimiento, cabe mencionar que para este caso en particular ya es conocido el comportamiento del tránsito con el paso del tiempo, puesto que desde el año en el que se elaboró el Proyecto Quetzalcóatl, en el 2014 hasta el 2023 año en el que se realiza este trabajo han pasado 9 años.

A continuación, se muestra el registro histórico del TPDA para la Vía Quetzalcóatl, incluyendo los datos publicados después del año de elaboración del proyecto en el que se basa este trabajo, tabla 31.

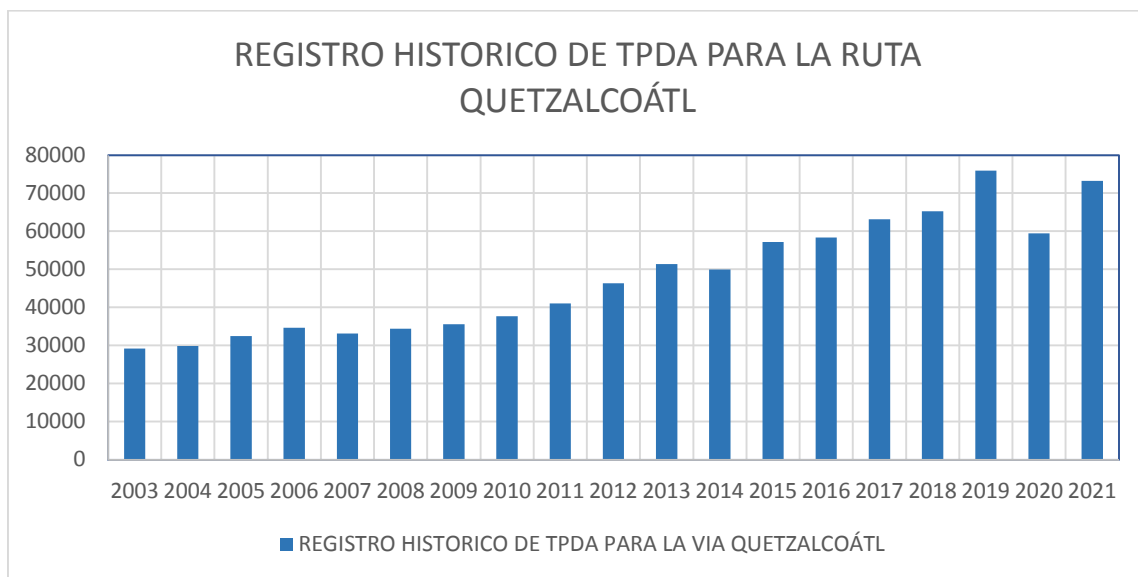
Tabla 31, Registro histórico de la Ruta Quetzalcóatl

TPDA HISTORICO DE LA Ruta QUETZALCOATL (RECTA A CHOLULA)			
AÑO	TPDA		TPDA COMBINADO
	Estación Cholula	Estación Puebla	
2003	11554	17657	29211
2004	11863	17964	29827
2005	14796	17656	32452
2006	14412	20207	34619
2007	14524	18557	33081
2008	15384	19027	34411
2009	16667	18927	35594
2010	17237	20436	37673
2011	18849	22184	41033
2012	21787	24539	46326
2013	25190	26123	51313
2014	23818	26078	49896
2015	28354	28768	57122
2016	29530	28771	58301
2017	32639	30440	63079
2018	33878	31360	65238
2019	35038	40870	75908
2020	30044	29337	59381
2021	34066	39127	73193

Los valores de TPDA que se muestran en la tabla fueron recabados por las publicaciones que realiza la SICT en el portal de datos viales.

Para mejor comprensión de los datos históricos de la zona de estudio se muestra la siguiente gráfica 2:

GRAFICA 2, Registro Histórico de la Ruta Quetzalcóatl



En esta grafica se aprecia de manera esquemática como se ha comportado el tránsito vehicular de la Ruta Quetzalcóatl.

En ella se observa que para el 2020 disminuye el tránsito, esto a consecuencia de la crisis de salud que se vivió por el covid-19.

Lo sucedido en ese año es evento atípico el cual no es causa de error el caculo de la tasa de crecimiento, ya que como se aprecia en la gráfica para el 2021 el repunte se asemeja al volumen del 2019, actualmente aún no se publican los datos del 2022, analizando la gráfica y se puede deducir que el volumen de tránsito aumentará para la próxima publicación.

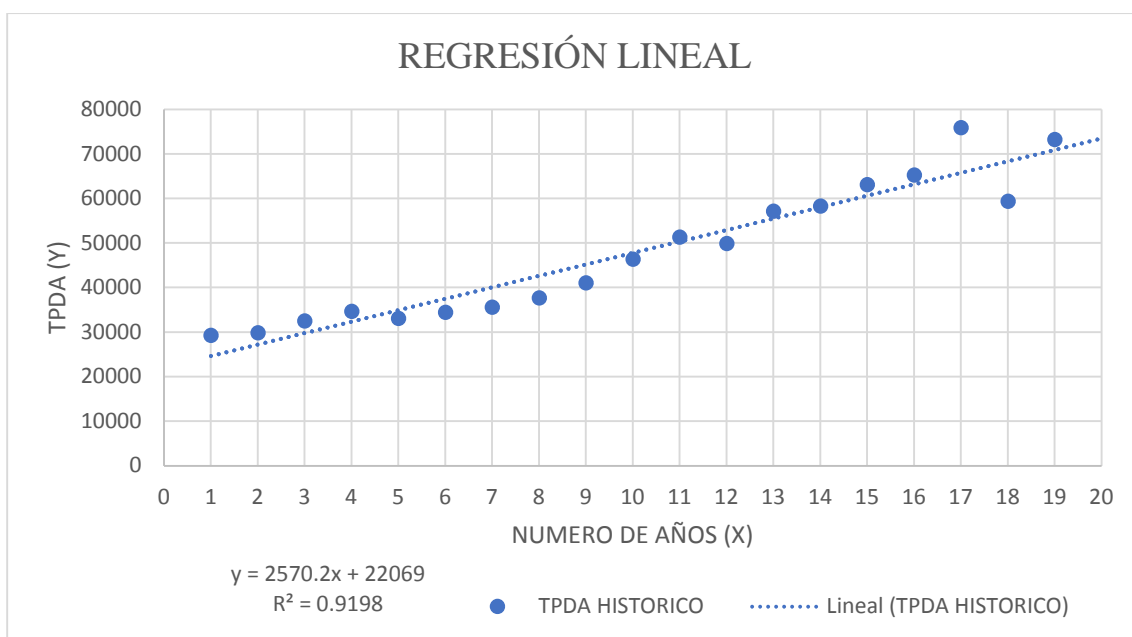
Teniendo la serie histórica de los volúmenes de tránsito de la Vía Quetzalcóatl, se utilizarán las regresiones matemáticas para la predicción del tránsito futuro, estas son:

regresión lineal, regresión curvilínea tipo exponencial, regresión curvilínea tipo potencial, regresión curvilínea tipo logarítmica.

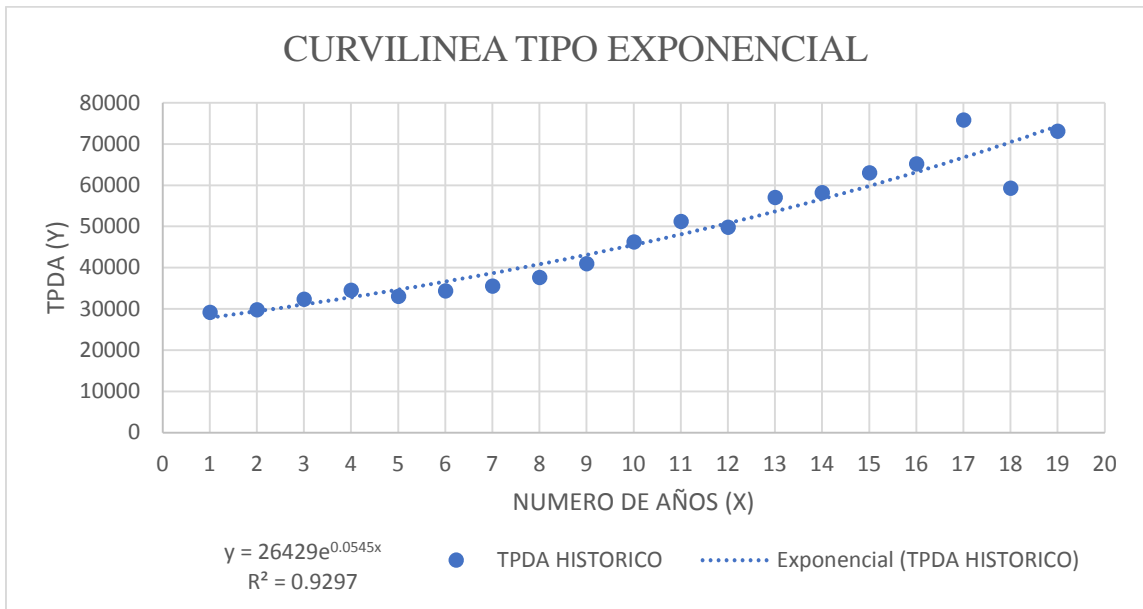
Para encontrar las ecuaciones de cada tipo de regresión se utilizarán graficas de dispersión, mismas que están basadas en los TPDA históricos y obtener las líneas de tendencia.

En seguida se muestran las gráficas de la 3 a 6 de regresiones lineales:

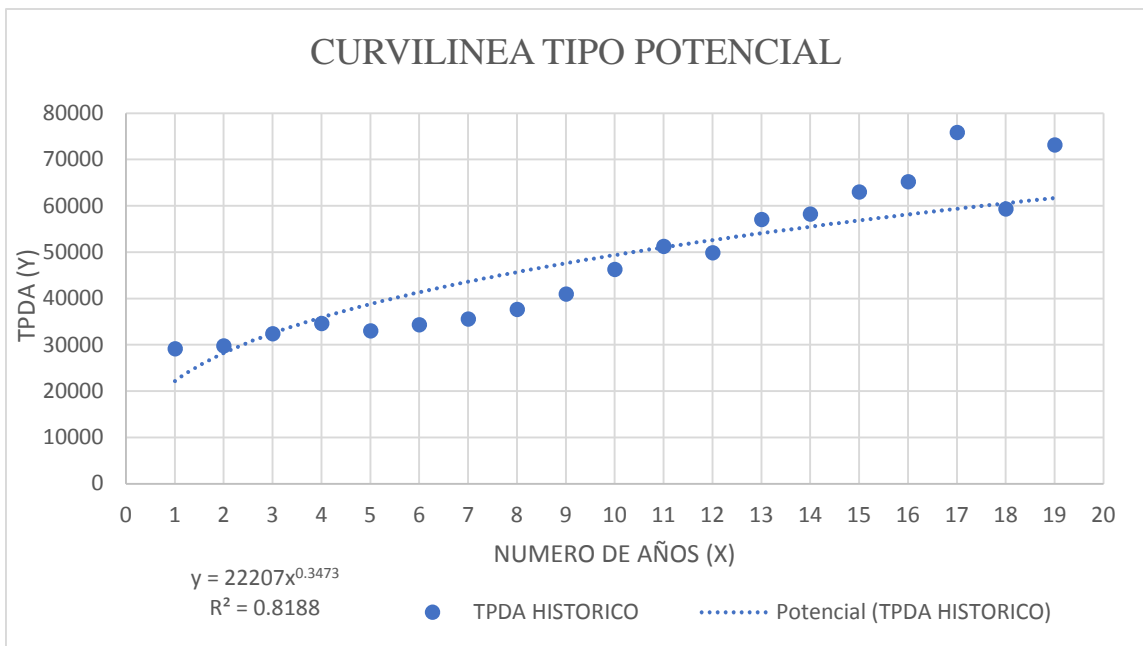
GRAFICA 3, REGRESIÓN LINEAL



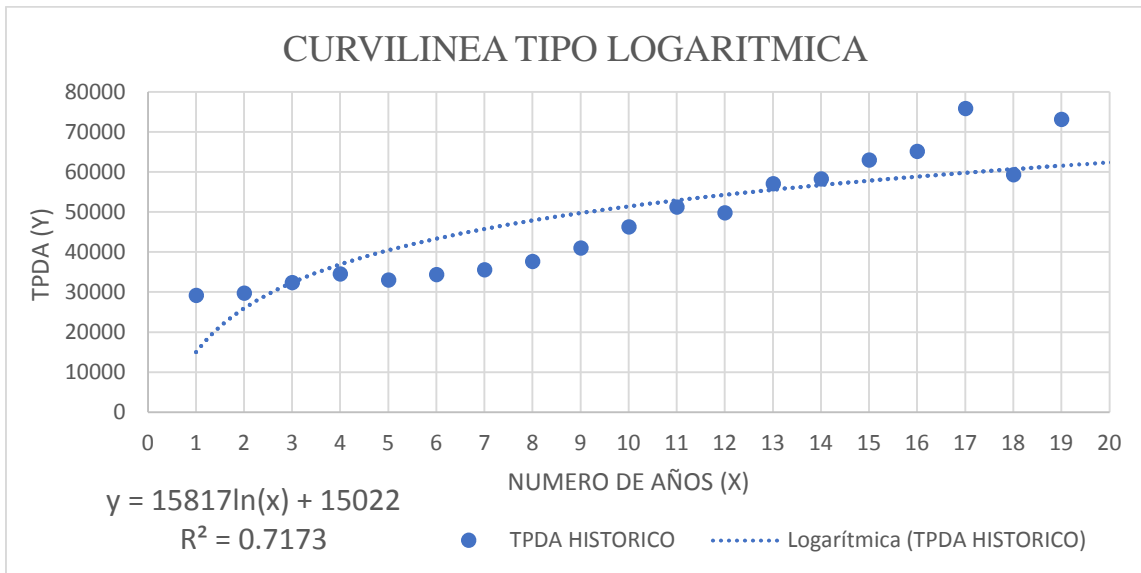
GRAFICA 4, CURVILINEA TIPO EXPONENCIAL



GRAFICA 5, CURVILINEA TIPO POTENCIAL



GRAFICA 6, CURVILINEA TIPO LOGARITMICA



A continuación se presenta la tabla 32 con las ecuaciones de regresión matemática para el cálculo para la estimación del tránsito futuro, en ella se muestra las fórmulas para cada regresión matemática.

En la tabla 33, se muestra el TPDA estimado para los años futuros:

Regresión lineal simple (línea de mínimos cuadrados) ecuación 30:

$$y = 2570.2*(x) + 22069$$

Regresión curvilínea tipo exponencial ecuación 31:

$$y = 26429*(e^{0.0545})^x$$

Regresión curvilínea tipo potencial ecuación 32:

$$y = (22207) *(x)^{0.3473}$$

Regresión curvilínea tipo logarítmica ecuación 33:

$$y = 15817\ln(x) + 15022$$

Tabla 32, Ecuaciones para estimación de transito futuro

TPDA HISTORICO DE LA RUTA QUETZALCOATL (RECTA A CHOLULA) Y CALCULOS DE TRANSITO FUTURO								
AÑO	TPDA		TPDA COMBINADO (y)	X	REGRESION LINEAL SIMPLE (LINEA DE MINIMOS CUADRADOS)	REGRESION CURVILINEA TIPO EXPONENCIAL	REGRESION CURVILINEA TIPO POTENCIAL	REGRESION CURVILINEA TIPO LOGARITMICA
	Estación Cholula	Estación Puebla			ECUACIONES			
					$y = 2570.2*(x) + 22069$	$y = 26429*(e^{0.0545})^x$	$y = (22207) * (x)^{0.3473}$	$y = 15817\ln(x) + 15022$
2003	11554	17657	29211	1				
2004	11863	17964	29827	2				
2005	14796	17656	32452	3				
2006	14412	20207	34619	4				
2007	14524	18557	33081	5				
2008	15384	19027	34411	6				
2009	16667	18927	35594	7				
2010	17237	20436	37673	8				
2011	18849	22184	41033	9				
2012	21787	24539	46326	10				
2013	25190	26123	51313	11				
2014	23818	26078	49896	12				
2015	28354	28768	57122	13				
2016	29530	28771	58301	14				
2017	32639	30440	63079	15				
2018	33878	31360	65238	16				
2019	35038	40870	75908	17				
2020	30044	29337	59381	18				
2021	34066	39127	73193	19				

Tabla 33, Estimación de tránsito futuro

TPDA HISTORICO DE LA VIA QUETZALCOATL (RECTA A CHOLULA) Y CALCULOS DE TRANSITO FUTURO								
AÑO	TPDA		TPDA COMBINADO (y)	X	REGRESION LINEAL SIMPLE	REGRESION CURVILINEA TIPO EXPONENCIAL	REGRESION CURVILINEA TIPO POTENCIAL	REGRESION CURVILINEA TIPO LOGARITMICA
	Estación Cholula	Estación Puebla			ECUACIONES			
					$y = 2570.2*(x) + 22069$	$y = 26429*(e^{0.0545})^x$	$y = \frac{(22207)*(x)^{0.347}}{3}$	$y = 15817\ln(x) + 15022$
2022	DATOS POR ESTIMAR	DATOS POR ESTIMAR	DATOS POR ESTIMAR	20	73473	78607	62855	62405
2023				21	76043	83010	63929	63177
2024				22	78613	87660	64970	63913
2025				23	81184	92570	65981	64616
2026				24	83754	97755	66963	65289
2027				25	86324	103230	67919	65935
2028				26	88894	109012	68851	66555
2029				27	91464	115118	69759	67152
2030				28	94035	121567	70646	67727
2031				29	96605	128376	71512	68283
2032				30	99175	135566	72359	68819
2033				31	101745	143160	73188	69337
2034				32	104315	151179	73999	69840

Realizando la comparación del pronóstico del tránsito futuro, para todos los casos se realizó una proyección a 20 años después del 2014, es porque se continúa teniendo como base el Proyecto Quetzalcóatl.

Por lo tanto, tenemos los siguientes datos:

Regresión lineal = $y_{2034} = 104,315 \text{ ve}/\text{día}$

Regresión curvilínea tipo exponencial = $y_{2034} = 151,179 \text{ ve}/\text{día}$

Regresión curvilínea tipo potencial = $y_{2034} = 73,999 \text{ ve}/\text{día}$

Regresión curvilínea tipo logarítmica = $y_{2034} = 69,840 \text{ ve}/\text{día}$

La comprobación de los datos futuros se hará siguiendo la fórmula del tránsito futuro:

$$FP_n = \frac{TF}{TA}$$

Ecuación 34, *Cálculo del factor de proyección, recuperada de:*

(Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Donde:

FP= Factor de proyección

n= años de proyección

TF= Transito futuro

TA= Transito actual

Sustituyendo en la ecuación 34 se obtiene:

$$\text{Regresión lineal} = FP_{20} = \frac{104315}{49447} = 2.10$$

$$\text{Regresión curvilínea tipo exponencial} = FP_{20} = \frac{151179}{49447} = 3.06$$

$$\text{Regresión curvilínea tipo potencial} = FP_{20} = \frac{73999}{49447} = 1.49$$

$$\text{Regresión curvilínea tipo logarítmica} = FP_{20} = \frac{69840}{49447} = 1.41$$

Para dar por valido el factor de proyección, este debe estar dentro del intervalo de 1.5 a 2.5

Observaciones:

- La regresión exponencial con el paso de los años tiende a pronosticar volúmenes más elevados en comparación a las demás regresiones.
- Los volúmenes futuros obtenidos mediante las regresiones potencial y logarítmica tienden ser a la baja.
- Apegándose al criterio de aceptación del factor de proyección, la regresión lineal arroja un factor que está dentro del parámetro. Por lo que el volumen obtenido a través de este método será el utilizado para calcular la tasa de crecimiento.

3.3.4 Determinación de la tasa de crecimiento

Para la determinación de este valor se utilizará el método de la tasa compuesta, la cual se obtiene empleando la siguiente ecuación 35:

$$T_C = \left(\frac{VF}{VA}\right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Ecuación 35, Calculo de la tasa de crecimiento, recuperada de:

(Rafael Cal y Mayor R., 2016)

Donde:

T_C = Tasa de crecimiento

VF= Valor final

VA= Valor actual

n= Número de años proyectados

Sustituyendo en la ecuación 35:

$$T_C = \left(\frac{104315}{49447}\right)^{\frac{1}{20}} - 1 = 1.038 - 1$$

$$T_C = 0.038$$

En porcentaje es igual a








$$T_C = 4\% \text{ Anual}$$

CAPITULO IV APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS A LA INGENIERIA DE PAVIMENTOS

4.1 Configuración vehicular y datos de proyección de tránsito.

Para la comparación de ejes equivalentes se comienza por presentar la configuración vehicular obtenida en este trabajo tabla 34 y la del Proyecto Quetzalcóatl tabla 35, mismas que serán utilizada para el cálculo de ESAL's.

Tabla 34, CONFIGURACIÓN VEHÍCULAR DE LA VÍA QUETZALCÓATL PARA 2014 OBTENIDA EN EL DESARROLLO DEL TEMA




CONFIGURACIÓN VEHÍCULAR DE LA VÍA QUETZALCÓATL PARA 2014 OBTENIDA EN EL DESARROLLO DEL TEMA			
CLASIFICACIÓN VEHÍCULAR	REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA	DEFINICIÓN	%
A		AUTOMOVIL LIGERO	92%
B		AUTOBUS DE PASAJEROS	1%
C2		CAMION DE CARGA 2 EJES	4%
C3		CAMION DE CARGA 3 EJES	0%
T3S2		TRACTO CAMION DE CARGA 3 EJES SEMIREMOLQUE 2 EJES	1%
T3S3		TRACTOCAMION CARGA TRACTOR 3 EJES SEMIREMOLQUE 3 EJES	2%
T3S2R4		TRACTO CAMION DE TRES EJES CON SEMIREMOLQUE 2 EJES Y REMOLQUE DE 4 EJES	0%

TPDA= 49 447 veh/día

Vida útil del proyecto = 15 años

Tasa de crecimiento = 4% anual

Tabla 35, CONFIGURACIÓN VEHÍCULAR DE LA VÍA QUETZALCÓATL OBTENIDA DEL PROYECTO QUETZALCÓATL

CONFIGURACIÓN VEHÍCULAR DE LA VÍA QUETZALCÓATL OBTENIDA DEL PROYECTO QUETZALCÓATL			
CLASIFICACIÓN VEHÍCULAR	REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA	DEFINICIÓN	%
A		AUTOMOVIL LIGERO	98
B		AUTOBUS DE PASAJEROS	1%
C2		CAMION DE CARGA 2 EJES	1%
C3		CAMION DE CARGA 3 EJES	0%
T3S2		TRACTO CAMION DE CARGA 3 EJES SEMIREMOLQUE 2 EJES	0%
T3S3		TRACTOCAMION CARGA TRACTOR 3 EJES SEMIREMOLQUE 3 EJES	0%
T3S2R4		TRACTO CAMION DE TRES EJES CON SEMIREMOLQUE 2 EJES Y REMOLQUE DE 4 EJES	0%

TPDA= 35 803 veh/día

Vida útil del proyecto = 15 años

Para este caso se tomará la tasa de proyecto como una tasa anual, ya que como se con anterioridad no se especifica si es tasa anual o la esperada al final de la vida del proyecto.

Tasa de crecimiento = 10% anual

4.2 Cálculo de ejes equivalentes

Para realizar una mejor comparación del efecto que tienen los volúmenes vehiculares y las tasas de crecimiento anteriormente expuestas, a continuación, se realizara una comparación convirtiendo el volumen de tránsito a ejes equivalentes.

Esto será utilizando el método publicado por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, para el cálculo de ejes equivalentes acumulados.

Se comenzará por obtener los ejes equivalentes de los datos originales para el Proyecto Quetzalcóatl.

Estos son, tabla 36:

Tabla 36, Datos generales

Carretera:	Ruta Quetzalcóatl
Tramo:	0+000 al 12+000
Tipo de camino:	A

De acuerdo con las características de la Vía Quetzalcóatl, el número de carriles y que en los lineamientos de circulación por esta vialidad no existe restricción de paso para algún tipo de vehículo, esta se puede considerar como tipo A.

Tabla 37, Datos de proyecto

DATOS DE PROYECTO				
TDPA (Veh/día)	Factor carril	Factor Sentido	Periodo Análisis (años)	Tasa Crecimiento (%)
35803	0.5	0.5	15	10

Para el factor de carril y el sentido se determina utilizar el 0.5, esto porque la Vía Quetzalcóatl cuenta con 2 sentidos y tres carriles por cada uno de ellos tabla 37.

En la siguiente tabla 38 se muestra el proceso de cálculo para los ejes equivalentes.

En la configuración vehicular se encuentra la que se obtuvo en el estudio de origen.

Para el coeficiente de distribución de carga, en este caso se deduce que la mayoría de los vehículos ligeros (A2) transitan a la máxima capacidad de carga, en el caso de vehículos

de pasajeros (B2) se deduce que en la mayoría de las ocasiones transita al 80% de capacidad, misma situación para los camiones de carga (C2).

Tabla 38, Calculo de ESAL's con datos originales del Proyecto Quetzalcóatl

Tipo	Composicion	Coeficiente de distribución de carga		Composición transito		Coeficiente daño Cargado				Coeficiente de daño Vacio				Num. ejes equivalente			
						carpeta y base		Sub y terra		carpeta y base		Sub y terra		carpeta y base		Sub y terra	
						z=0	z=15	z=30	z=60	z=0	z=15	z=30	z=60	z=0	z=15	z=30	z=60
Vehículo	Tránsito	cargados	vacios	cargados	vacios	z=0	z=15	z=30	z=60	z=0	z=15	z=30	z=60	z=0	z=15	z=30	z=60
A2	98.00%	100%	0%	98.0%	0.0%	0.005	0.0002	0.000	0.0000	0.005	0.0001	0.000	0.0000	0.0046	0.0002	0.0000	0.0000
B2	1.00%	80%	20%	0.8%	0.2%	2.000	2.896	5.847	9.1393	2.000	0.757	0.520	0.4431	0.0200	0.0247	0.0478	0.0740
C2	1.00%	80%	20%	0.8%	0.2%	2.000	2.896	5.847	9.1393	2.000	0.123	0.027	0.0145	0.0200	0.0234	0.0468	0.0731
C3	0.00%	80%	20%	0.0%	0.0%	3.000	3.955	4.574	6.5182	3.000	0.154	0.040	0.0227	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T3-S2	0.00%	80%	20%	0.0%	0.0%	5.000	6.727	7.419	10.2449	5.000	0.160	0.040	0.0227	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T3-S3	0.00%	80%	20%	0.0%	0.0%	6.000	7.508	8.944	13.0483	6.000	0.155	0.040	0.0227	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T3-S2-R4	0.00%	80%	20%	0.0%	0.0%	9.000	7.018	4.644	4.6447	9.000	0.166	0.040	0.0228	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100.00%										Ejes equival transi unitario				0.0446	0.0483	0.0947	0.1471
										T DPA del carril de proy				8950.75	8950.75	8950.75	8950.75
										Ct				11,596.96	11,596.96	11,596.96	11,596.96
										Ejes equivalentes				4,633,518	5,010,629	9,827,297	15,273,781

Para hallar los esfuerzos provocados por los diferentes ejes de los vehículos, se utiliza la Teoría de Boussinesq, evaluándolos en las diferentes capas del pavimento, siguiendo la formula mostrada a continuación:

$$\log K_{di} = \frac{\log \sigma_{zi} - \log \sigma_{zeq}}{\log a}$$

Teniendo los coeficientes de daño de cada tipo de vehículo se realiza el cálculo de los ESALS, mismos que se obtienen con la siguiente formula:

$$ESALS = (TPDA)(C_D)(T_0)(CAT)$$

TPDA: es el transito con el cual se realizó el Proyecto Quetzalcóatl.

C_D : es el coeficiente de distribución, que se encuentra en la fila TPDA del carril de proyecto.

T_0 : es el coeficiente de aplicaciones de carga de los ejes, que se encuentra en la fila Ejes equivalentes de tránsito unitario.

CAT: Este es el coeficiente de acumulación del tránsito durante la vida de proyecto, este coeficiente se encuentra en la fila CAT.

Sustituyendo cada uno de los valores antes mencionados en la fórmula de cálculo de ESALS, se obtienen los ejes equivalentes para cada capa de la estructura del pavimento tabla 39.

Tabla 39, Ejes equivalentes para el diseño de capas estructurales

Capas	Ejes equivalentes
Carpeta asfáltica	4,633,518
Base hidráulica	5,010,629
Subbase hidráulica	9,827,297
Terracerías	15,273,781

Para este caso se utilizarán los resultados del tránsito promedio diario anual, la configuración vehicular y la tasa de crecimiento obtenidos de los cálculos de actualización para este trabajo tabla 40.

Tabla 40, Datos generales

Carretera:	Ruta Quetzalcóatl
Tramo:	0+000 al 12+000
Tipo de camino:	A

Se conserva el mismo tipo de camino, siendo este el tipo A.

Tabla 41, Datos generales

DATOS DE PROYECTO				
TDPA (Veh/día)	Factor carril	Factor Sentido	Periodo Análisis (años)	Tasa Crecimiento (%)
49447	0.5	0.5	15	4

Se mantiene el mismo factor de carril, sentido y los años de proyecto tabla 41.

En la siguiente tabla 42 se muestra el proceso de cálculo para los ejes equivalentes de estos datos actualizados.

Como se mencionó con anterioridad la configuración vehicular se cambia a la obtenida en el desarrollo de este trabajo.

Por lo que el coeficiente de distribución de carga, para los vehículos ligeros (A2) se sigue manejando que transitan a la máxima capacidad de carga, en el caso de vehículos de pasajeros (B2), camiones de carga (C2), tracto camión de carga 3 ejes semirremolque 2 ejes (T3S2) y tractocamión carga tractor 3 ejes semirremolque 3 ejes (T3S3) se mantiene el 80% de viajes cargados.

Tabla 42, Calculo de ESAL's con datos obtenidos de este trabajo

Tipo	Composicion	Coeficiente de distribución de carga		Composición transito		Coeficiente daño Cargado				Coeficiente de daño Vacio				Num. ejes equivalente			
						carpeta y base		Sub y terra		carpeta y base		Sub y terra		carpeta y base		Sub y terra	
						z=0	z=15	z=30	z=60	z=0	z=15	z=30	z=60	z=0	z=15	z=30	z=60
Vehículo	Tránsito	cargados	vacios	cargados	vacios	z=0	z=15	z=30	z=60	z=0	z=15	z=30	z=60	z=0	z=15	z=30	z=60
A2	92.00%	100%	0%	92.0%	0.0%	0.005	0.0002	0.000	0.0000	0.005	0.0001	0.000	0.0000	0.0044	0.0002	0.0000	0.0000
B2	1.00%	80%	20%	0.8%	0.2%	2.000	2.896	5.847	9.1393	2.000	0.757	0.520	0.4431	0.0200	0.0247	0.0478	0.0740
C2	4.00%	80%	20%	3.2%	0.8%	2.000	2.896	5.847	9.1393	2.000	0.123	0.027	0.0145	0.0800	0.0936	0.1873	0.2926
C3	0.00%	80%	20%	0.0%	0.0%	3.000	3.955	4.574	6.5182	3.000	0.154	0.040	0.0227	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
T3-S2	1.00%	80%	20%	0.8%	0.2%	5.000	6.727	7.419	10.2449	5.000	0.160	0.040	0.0227	0.0500	0.0541	0.0594	0.0820
T3-S3	2.00%	80%	20%	1.6%	0.4%	6.000	7.508	8.944	13.0483	6.000	0.155	0.040	0.0227	0.1200	0.1207	0.1433	0.2089
T3-S2-R4	0.00%	80%	20%	0.0%	0.0%	9.000	7.018	4.644	4.6447	9.000	0.166	0.040	0.0228	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
100.00%										Ejes equival transi unitario			0.2744	0.2934	0.4378	0.6574	
										TDPA del carril de proy			12361.75	12361.75	12361.75	12361.75	
										Ct			7,308.61	7,308.61	7,308.61	7,308.61	
										Ejes equivalentes			24,787,143	26,505,545	39,558,219	59,398,088	

Como se mostró en el procedimiento anterior, se utiliza la Teoría de Boussinesq para obtener el coeficiente de daño para cada capa del pavimento.

Teniendo los coeficientes de daño de cada tipo de vehículo se realiza el cálculo de los ESALS

Sustituyendo cada uno de los nuevos resultados en la fórmula de cálculo de ESALS, se obtienen los ejes equivalentes para cada capa de la estructura del pavimento tabla 43.

Tabla 43, Ejes equivalentes para el diseño de capas estructurales

Capas	Ejes equivalentes
Carpeta asfáltica	24,787,143
Base hidráulica	26,505,545
Subbase hidráulica	39,558,219
Terracerías	59,398,088

4.3 Comparación de ejes equivalentes

Habiendo realizado el cálculo de ejes equivalentes de los datos originales y los actualizados en este trabajo, a continuación, se presenta una tabla 44 comparativa de los resultados.

Tabla 44, Comparación de ejes equivalentes para diseño de capas estructurales

Capas	Ejes equivalentes	
	Obtenidos con Datos originales	Obtenidos con Datos actualizados
Carpeta asfáltica	4,633,518	24,787,143
Base hidráulica	5,010,629	26,505,545
Subbase hidráulica	9,827,297	39,558,219
Terracerías	15,273,781	59,398,088

Analizando la tabla 44 anteriormente expuesta es notable que la diferencia entre los ejes equivalentes es amplia, esto indica que el tener un volumen de tránsito promedio diario anual inferior al que realmente transitaba por la zona y una tasa de crecimiento elevada, impacto de gran manera en el diseño del pavimento.

Para tener un mejor panorama de la actualidad de la Vía Quetzalcóatl se realizó un recorrido de inspección visual a lo largo de la esta vialidad y en ambos sentidos.

Cabe mencionar que en esta vía se realizaron actividades de mantenimiento que constaron de corte y reposición de la carpeta asfáltica en zonas dañadas, dichas actividades fueron realizadas en el transcurso del 2021.

A continuación, se muestran una serie de imágenes como resultado del recorrido en la Vía Quetzalcóatl.



Sentido: Cholula-puebla.

En esta imagen se puede apreciar el desprendimiento del tratamiento de riego de sello.



Sentido: Cholula-puebla.

Existe presencia de deterioro por fatiga que ha comenzada a presentar desprendimiento de agregado pétreo de la carpeta asfáltica.



Sentido:
Puebla-Cholula.

Se observa presencia de zonas con agrietamiento por fatiga de la carpeta asfáltica.



Sentido:
Puebla-Cholula.

Se observan grietas longitudinales en el pavimento y zonas con pulimento en la superficie de rodadura.



Sentido:
Puebla-Cholula.

Se visualizan zonas de pulimento de la carpeta asfáltica.



Sentido:

Puebla-Cholula.

Se aprecia cambio de la tonalidad de la capeta asfáltica, esto se debe a los trabajos de mantenimiento de la vía.

Con la evidencia fotográfica expuesta se aprecia que las fallas más comunes del pavimento son por fatiga, por lo que es necesario un mantenimiento periódico de corte y reposición, sellado de grietas y tratamientos superficiales que mejoren la textura del pavimento.

También se descarta la formación permanente, puesto que no se encontraron roderas profundas.

Lo cual significa que la estructura del pavimento es estable y que la diferencia de la de los ejes equivalentes calculados afecta más a la carpeta asfáltica, puesto que la Vía Quetzalcóatl está diseñada para el tránsito de vehículos sencillos, que a su vez generan poca deformación a las capas inferiores del pavimento.

Conclusiones

El desarrollo de este trabajo brinda una alternativa de predicción del tránsito diario para casos donde no se pueden realizar aforos vehiculares durante el periodo de una semana completa, cabe resaltar que al menos se debe de contar con datos de 3 a 4 días forados puesto que de esta manera la confiabilidad de la predicción es mayor.

Esta metodología de trabajo es aplicable para vialidades interurbanas o donde la configuración vehicular este conformada en su mayoría por vehículos ligeros.

Así mismo con la interpretación de los resultados obtenidos se evalúan las hipótesis planteadas para este trabajo.

La primera hipótesis fue posible comprobarla al determinar el tránsito promedio diario anual, con base al cálculo de predicción del tránsito

diario, esto se puede ver en el capítulo III, donde se realiza la comparación del TPDA publicado por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes en los datos viales respecto al obtenido en este trabajo el cual tiene un porcentaje de confiabilidad del 90 %, teniendo como resultado un volumen vehicular semejante.

Para la segunda hipótesis, de acuerdo con los datos originales del Proyecto Quetzalcóatl la tasa de crecimiento esta sobreestimada puesto que el tránsito promedio diario anual es inferior al registrado por los datos viales de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, lo cual altera el procedimiento de cálculo de la tasa de crecimiento haciendo de esta poco confiable, a su vez comprando los números de ejes equivalentes obtenidos con los datos actualizados en el desarrollo de este trabajo respecto a los conseguidos con los datos originales, se confirma que si incrementa el daño en la carpeta asfáltica, lo cual disminuye la vida útil del pavimento y hace necesario que los trabajos de mantenimiento a esta vialidad sean continuos.

Bibliografía

- C.V, G. S. (2014). *Proyecto Quetzacóatl*. H. Ciudad de Puebla.
- G., R. C.-J. (2016). Sistema Vial Urbano. En R. C.-J. G., *Ingeniería de Tránsito Fundamentos y Aplicaciones* (pág. 114). Ciudad de Mexico.
- Gutierrez, M. C. (2022). Ingeniería de Tránsito Aplicada a Pavimentos. *Ingeniería de Tránsito Aplicada a Pavimentos*. H. Ciudad de Puebla.
- Miron, .. (02 de 05 de 2019). *El Sol de Puebla*. Obtenido de <http://www.elsoldepuebla.com.mx>
- Rafael Cal y Mayor R., J. C. (2016). Ingeniería de Tránsito Fundamentos y Aplicaciones . En J. C. Rafael Cal y Mayor R., *Ingeniería de Tránsito Fundamentos y Aplicaciones* (pág. 180). Mexico: Alfaomega.
- Schumacher, M. (01 de 2016). *ResearchGate*. Obtenido de <http://researchgate.net>
- Transportes, D. G. (2014). *NOM-012-SCT-2-2014*. Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2002). *Desgaste Mediante la Prueba de los Ángeles, M·MMP·4·04·006/02* . Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2002). *Granulometría de Materiales Pétreos para mezclas asfálticas, M·MMP·4·04·002/02* . Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2003). *Desprendimiento por Fricción en Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·009/03*. Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2003). *Intemperismo Acelerado de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·008/03*. Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2009). *Azul de Metileno de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·014/09*. Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2009). *Partículas Trituradas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·013/09*. Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2016). *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras, N·CMT·4·05·003/16*. Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2016). *Equivalente de Arena de Materiales Pétreos Para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·004/16* . Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2017). *Materiales Péreos para Mezclas Asfálticas, N·CMT·4·04·17* . Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2018). *Densidades Relativas y Absorción de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas, M·MMP·4·04·003/18*. Ciudad de Mexico.
- Transportes, S. d. (2019). *Grado de Compactacion, M·MMP·1·10/19*. Ciudad de Mexico.

Transportes, S. d. (2020). *Partículas Alargadas y Lajeadas*, M·MMP·4·01·016/20. Ciudad de Mexico.

Transportes, S. d. (2021). *Materiales para Subbases*, N·CMT·4·02·001/21. Ciudad de Mexico.

Transportes, S. d. (2021). *Materiales para Subrasante*, N·CMT·1·03/21. Ciudad de Mexico.

Transportes, S. d. (2021). *Materiales para subyacente*, N·CMT·1·02/21. Ciudad de Mexico.

Transportes, S. d. (2021). *Materiales Para Terracerías*, N·CMT·1·01/21. Ciudad de Mexico.

Transportes, S. d. (2021). *Pulimento Acelerado*, M·MMP·4·04·016/21. Ciudad de Mexico.

Transportes, S. d. (2022). *Materiales para Bases Hidráulicas*, N·CMT·4·02·002/22. Ciudad de Mexico.

Transportes, S. d. (2023). *Valor de Soporte de California (CBR) en Laboratorio*, M·MMP·4·01·007/23. Ciudad de Mexico.

Transportes, S. d. (s.f.). *Calidad de Mezclas Asfálticas para Carreteras* .