



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS TEÓRICO DE CONCRETO PERMEABLE PARA DRENAJE SUPERFICIAL  
POR INFILTRACIÓN EN EL PROYECTO MINERO PROGRESO VII DERIVADA,  
UTILIZANDO EL SISTEMA TOPMIX COMO SOLUCIÓN A LA REDUCCIÓN DEL  
IMPACTO AMBIENTAL A LA REGIÓN**

**Orlando Raúl Carrera Alvizures**

Asesorado por el Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarría

Guatemala, marzo de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS TEÓRICO DE CONCRETO PERMEABLE PARA DRENAJE SUPERFICIAL  
POR INFILTRACIÓN EN EL PROYECTO MINERO PROGRESO VII DERIVADA,  
UTILIZANDO EL SISTEMA TOPMIX COMO SOLUCIÓN A LA REDUCCIÓN DEL  
IMPACTO AMBIENTAL A LA REGIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**ORLANDO RAÚL CARRERA ALVIZURES**

ASESORADO POR EL ING. WUILLIAN RICARDO YON CHAVARRÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, MARZO DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS TEÓRICO DE CONCRETO PERMEABLE PARA DRENAJE SUPERFICIAL  
POR INFILTRACIÓN EN EL PROYECTO MINERO PROGRESO VII DERIVADA,  
UTILIZANDO EL SISTEMA TOPMIX COMO SOLUCIÓN A LA REDUCCIÓN DEL  
IMPACTO AMBIENTAL A LA REGIÓN**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,  
con fecha 19 de febrero de 2020.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval. The signature is stylized and appears to read 'Orlando Raúl Carrera Alvizures'. There are several horizontal lines and a vertical line intersecting the signature, possibly representing a signature or a mark.

**Orlando Raúl Carrera Alvizures**

Guatemala 12 de octubre de 2020

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Jefe del departamento de materiales de construcción y  
Construcciones civiles  
Facultad de ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Orlando Raúl Carrera Alvizures, quien se identifica con el Registro Académico 2009-24438 CUI No. 1615 73754 0105, titulado **ANÁLISIS TEÓRICO DE CONCRETO PERMEABLE PARA DRENAJE SUPERFICIAL POR INFILTRACIÓN EN EL PROYECTO MINERO PROGRESO VII DERIVADA, UTILIZANDO SISTEMA TOPMIX COMO SOLUCIÓN A REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL A LA REGIÓN**, y de haber hecho las correcciones necesarias del mismo, lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Son otro particular, me despido atentamente.

"ID y Enseñad a Todos"



**Wuillian Ricardo Yon Chavarría**  
**INGENIERO CIVIL**  
**COL No. 2029**

Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarría

Colegiado No. 2029

Docente del Departamento de materiales de construcción

Y construcciones civiles



Guatemala, 26 octubre de 2020

Ingeniero  
Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Director Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Aguilar,

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **“ANÁLISIS TEÓRICO DE CONCRETO PERMEABLE PARA DRENAJE SUPERFICIAL POR INFILTRACIÓN EN EL PROYECTO MINERO PROGRESO VII DERIVADA, UTILIZANDO EL SISTEMA TOPMIX COMO SOLUCIÓN A LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL A LA REGIÓN”**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Orlando Raúl Carrera Alvizures, quién contó con la asesoría del Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarría.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo, doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco  
Coordinador del área de Materiales de  
Construcción y Obras Civiles



**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**AREA DE MATERIALES Y**  
**CONSTRUCCIONES CIVILES**  
**USAC**





El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Wuillian Ricardo Yon Chavarría y del Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco al trabajo de graduación del estudiante Orlando Raúl Carrera Alvizures **ANÁLISIS TEÓRICO DE CONCRETO PERMEABLE PARA DRENAJE SUPERFICIAL POR INFILTRACIÓN EN EL PROYECTO MINERO PROGRESO VII DERIVADA, UTILIZANDO SISTEMA TOPMIX COMO SOLUCIÓN A REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL A LA REGIÓN**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Armando Fuentes Roca  
Director Escuela Ingeniería Civil

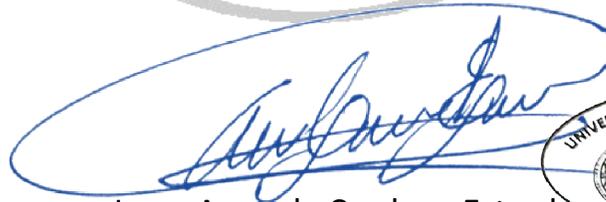
Guatemala, marzo 2021  
/mrrm.



DTG. 101.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS TEÓRICO DE CONCRETO PERMEABLE PARA DRENAJE SUPERFICIAL POR INFILTRACIÓN EN EL PROYECTO MINERO PROGRESO VII DERIVADA, UTILIZANDO EL SISTEMA TOPMIX COMO SOLUCIÓN A LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL A LA REGIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Orlando Raúl Carrera Alvizurez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, marzo de 2021

/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Quien me ha brindado sabiduría y entendimiento para tomar las mejores decisiones en mi diario vivir.
- Mi padre** Anacleto Carrera, por ser un modelo de hombre a seguir y por enseñarme que el respeto y el trabajo arduo son los pilares para lograr las metas.
- Mi madre** Olivia Alvizures de Carrera (q. e. p. d), por darme la vida y a pesar de su temprana partida, su ejemplo y memoria han sido mi inspiración.
- Mis hermanos** Gloria, Alvaro, Elvin, Main, Elvia, Lilian, Mynor y Derian, por su ayuda, consejos y aportes día con día para lograr mis triunfos.
- Mis sobrinos** A los presentes y futuros. Por ser la alegría de la familia y porque formarán un mejor mundo donde vivir. En especial a Gloria Carrera, porque más que una sobrina, es una hermanita.
- Mis cuñados** Por ser parte importante en mi carrera.

## AGRADECIMIENTOS A:

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi casa de estudios, que me ha brindado los conocimientos necesarios para mi formación académica en cada una de sus aulas.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por mi formación profesional a través de cada uno de sus catedráticos, quienes impartieron de forma incansable sus conocimientos.
<b>Kappes, Cassiday &amp; Associates</b>	Por el apoyo prestado para el desarrollo de esta investigación.
<b>Exmingua, S.A.</b>	Por brindar todas las herramientas que permitieron lograr esta investigación.
<b>Ing. Daniel W. Kappes</b>	Presidente y <i>CEO</i> de <i>Kappes, Cassiday &amp; Associates</i> , por ser un excelente líder, mentor y amigo.
<b>Víctor M. Marroquín M.</b>	Por su apoyo incondicional para cumplir mis metas profesionales.
<b>Ing. Wuillian Yon</b>	Por ser mi asesor, compartir sus conocimientos y experiencias de manera atenta y lograr la culminación de esta investigación.

**A mis amigos**

Guillermo Lucero, Jorge García, María José Hernández y Alex Vaidés por sus consejos y ayuda incondicional.

**Ing. Frederick E. Bird**

Por su ayuda desinteresada y por adentrarme en el mundo de la minería.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IX
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XV
GLOSARIO .....	XVII
RESUMEN.....	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN .....	XXVII
1.    CONCEPTOS GENERALES.....	1
1.1.    Conceptos generales de hidrología .....	1
1.1.1.    Cuenca hidrológica .....	1
1.1.2.    Ciclo hidrológico .....	9
1.1.2.1.    Precipitación .....	10
1.1.2.2.    Evaporación.....	11
1.1.2.3.    Evapotranspiración .....	12
1.1.2.4.    Infiltración .....	13
1.1.2.5.    Escorrentía .....	13
1.1.3.    Balance hídrico .....	14
1.1.4.    Tormentas de diseño .....	15
1.1.4.1.    Relaciones    intensidad-duración-	
frecuencia .....	15
1.1.5.    Aguas subterráneas.....	17
1.1.5.1.    Recarga hídrica .....	21
1.1.5.2.    Zonas de recarga hídrica .....	22
1.2.    Conceptos de pavimentos .....	23
1.2.1.    Estructura de un pavimento.....	24

1.2.1.1.	Subrasante .....	24
1.2.1.2.	Subbase .....	25
1.2.1.3.	Base .....	25
1.2.1.4.	Carpeta de rodadura .....	26
1.2.2.	Propiedades mecánicas y físicas de las estructura portante .....	27
1.2.2.1.	Granulometría para base y subbase ....	27
1.2.2.2.	Propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos .....	29
1.2.2.3.	CBR.....	29
1.2.2.4.	Características del suelo .....	33
1.2.3.	Diseño de pavimento asfáltico.....	33
1.2.3.1.	Propiedades y características de la mezcla asfáltica.....	34
1.2.3.2.	Diseño por método AASHTO 93 .....	35
2.	DESCRIPCIÓN HIDROGEOLOGÍA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO LOS ACHIOTES .....	55
2.1.	Descripción geomorfológica de la microcuenca del río Los Achiotes .....	55
2.1.1.	Ubicación geográfica.....	55
2.1.2.	Morfología y topografía .....	57
2.1.3.	Geología.....	58
2.1.4.	Hidrografía.....	63
2.1.5.	Uso de suelo .....	63
2.2.	Descripción hidrológica de la microcuenca del río Los Achiotes .....	64
2.2.1.	Características hidrológicas .....	64
2.2.1.1.	Macrocuencas y subcuencas .....	64

2.2.1.2.	Red fluvial.....	65
2.2.1.3.	Climatología.....	65
2.2.1.4.	Lluvia .....	66
2.2.2.	Aguas superficiales de la Microcuenca del río Los Achiotos.....	68
2.2.3.	Aguas subterráneas de la microcuenca del río Los Achiotos.....	69
2.2.4.	Recurso hídrico.....	70
2.2.4.1.	Oferta hídrica .....	71
2.2.4.2.	Demanda hídrica .....	72
2.2.4.3.	Uso del recurso hídrico.....	73
2.2.4.4.	Calidad del agua.....	74
2.2.5.	Problemática de la hidrología general de la región.....	77
3.	PAVIMENTOS PERMEABLES.....	81
3.1.	Tipos de pavimentos permeables.....	81
3.1.1.	Adoquines.....	81
3.1.2.	Concretos hidráulicos permeables.....	82
3.1.3.	Mezclas asfálticas permeables.....	82
3.2.	Elementos de la estructura portante para pavimentos permeables.....	83
3.2.1.	Capa granular .....	84
3.2.2.	Geosintéticos y geoplásticos .....	84
3.2.3.	Drenajes .....	86
3.2.4.	Permeabilidad del suelo .....	86
3.3.	Diseño estructural para pavimentos permeables.....	87
3.3.1.	Requerimientos de carga y tráfico .....	88
3.3.2.	Diseño de la estructura de soporte .....	89

3.3.2.1.	Requerimientos de físicos y mecánicos .....	89
3.3.2.2.	Determinación de capa granular .....	90
3.3.3.	Diseño de carpeta de rodadura para concreto hidráulico (ACI 522).....	91
3.3.3.1.	Requerimientos de calidad del concreto.....	92
3.3.3.1.1.	Ensayos al material.....	92
3.3.3.1.2.	Pruebas al concreto en obra.....	94
3.3.3.1.3.	Ensayos de laboratorio al concreto...	95
3.3.3.2.	Diseño de mezcla.....	96
3.3.3.3.	Método de carpeta de rodadura de concreto hidráulico permeable (metodología ACI 522R-06).....	97
3.3.4.	Diseño para concreto asfáltico permeable (AASHTO-93).....	98
3.3.4.1.	Requerimientos de calidad del concreto.....	98
3.3.4.1.1.	Ensayos al material pétreo.....	99
3.3.4.1.2.	Pruebas al material bituminoso.....	100
3.3.4.1.3.	Ensayos de laboratorio al concreto asfáltico.....	101
3.3.4.2.	Diseño de mezcla asfáltica.....	103

3.3.4.3.	Método de diseño para la carpeta de rodadura de concreto asfáltico permeable (AASHTO-93 modificada)	104
3.4.	Diseño hidráulico .....	105
3.4.1.	Reservorio .....	106
3.4.2.	Volumen de afluente.....	107
3.4.3.	Volumen de almacenamiento .....	108
3.4.4.	Metodologías de diseño hidrológico .....	110
3.5.	Colmatación.....	111
4.	MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS PERMEABLES TOPMIX.....	113
4.1.	Descripción de la mezcla asfáltica Topmix.....	113
4.2.	Propiedades del material asfáltico.....	115
4.2.1.	Propiedades físicas y químicas .....	115
4.2.2.	Propiedades mecánicas e ingenieriles .....	118
4.3.	Usos típicos propuestos .....	123
5.	ANÁLISIS COMPARATIVO.....	125
5.1.	Descripción específica del lugar en análisis .....	125
5.1.1.	Ubicación geográfica .....	127
5.1.2.	Consideraciones de lluvia.....	128
5.1.3.	Capacidad de infiltración .....	130
5.1.3.1.	Tipo de suelo .....	130
5.1.3.2.	Descripción del ensayo y obtención de resultados .....	132
5.1.3.3.	Índices de infiltración .....	136
5.2.	Análisis de comparación.....	139

5.2.1.	Diseño del elemento arquitectónico para el análisis .....	140
5.2.1.1.	Requerimientos de diseño.....	141
5.2.1.2.	Modelo arquitectónico .....	143
5.2.2.	Diseño de pavimento permeable de concreto hidráulico.....	144
5.2.2.1.	Diseño estructural del pavimento de concreto hidráulico .....	144
5.2.2.2.	Diseño hidráulico del pavimento de concreto hidráulico .....	156
5.2.3.	Diseño de pavimento permeable de mezcla asfáltica estándar .....	162
5.2.3.1.	Diseño estructural del pavimento de mezcla asfáltica estándar.....	162
5.2.3.2.	Diseño hidráulico del pavimento de mezcla asfáltica estándar.....	168
5.2.4.	Diseño de pavimento permeable de mezcla asfáltica Topmix .....	169
5.2.4.1.	Diseño estructural del pavimento de mezcla asfáltica Topmix .....	170
5.2.4.2.	Diseño hidráulico del pavimento de mezcla asfáltica Topmix .....	173
5.3.	Modelos de comparación .....	175
5.3.1.	Comparación precipitación-volumen de almacenaje .....	175
5.3.2.	Infiltración del pavimento.....	178
5.3.3.	Eficiencia.....	180

CONCLUSIONES .....	185
RECOMENDACIONES .....	187
BIBLIOGRAFÍA.....	189
APÉNDICES .....	195
ANEXOS .....	199



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Corriente principal de una cuenca.....	2
2.	Parte aguas de una cuenca .....	3
3.	Cuenca, subcuencas y microcuencas.....	4
4.	Partes de una cuenca .....	5
5.	Tipos de cuencas .....	6
6.	Mapa de cuencas hidrográficas de Guatemala .....	7
7.	Ciclo hidrológico.....	9
8.	Curva Intensidad duración frecuencia.....	16
9.	Distribución de las aguas subterráneas .....	18
10.	Gráfica de diseño para estructuras de pavimento flexible.....	37
11.	Cálculo del módulo de resiliencia efectivo de la subrasante en pavimentos flexibles.....	43
12.	Variación de los coeficientes de capa “a <sub>2</sub> ”, en bases granulares .....	46
13.	Variación de los coeficientes de capa “a <sub>3</sub> ” en subbases granulares ....	47
14.	Variación de los coeficientes capa “a <sub>2</sub> ” en bases estabilizadas con cemento Portland .....	48
15.	Variación de los coeficientes de capa “a <sub>2</sub> ” en bases estabilizadas con asfalto .....	49
16.	Recomendación de AASTHO.....	53
17.	Área de la microcuenca del río Los Achiotés .....	56
18.	Placas tectónicas dentro de Guatemala.....	59
19.	Mapa geológico regional .....	62
20.	Climadiagrama de la estación de San Pedro Ayampuc .....	66

21.	Regiones hidrológicas de la microcuenca del río Los Achiotes .....	67
22.	Puntos de aforo de la microcuenca del río Los Achiotes .....	68
23.	Sección típica de un sistema de pavimento concreto poroso .....	107
24.	Colmatación del filtro por penetración de partículas .....	111
25.	Colores disponibles para el Topmix .....	117
26.	Sistema A. Filtración completa .....	119
27.	Sistema B. Filtración parcial .....	121
28.	Sistema C. Atenuación completa .....	122
29.	Área de intervención del proyecto minero Progreso VII Derivada .....	126
30.	Área destinada a la construcción denominada Campamento .....	128
31.	Esquema de la prueba de infiltración .....	134
32.	Gráfica para el cálculo de la capacidad de absorción del suelo a partir de la tasa de infiltración encontrada en campo .....	136
33.	Puntos para la realización de la prueba de infiltración .....	138
34.	Resultados de infiltración .....	140
35.	Dimensiones de diseño para parqueos .....	142
36.	Propuesta final para la construcción de área denominada campamento .....	143
37.	Monograma para el diseño de pavimentos rígidos, parte 1 .....	153
38.	Monograma para el diseño de pavimentos rígidos, parte 2 .....	154
39.	Catalogo de estructuras de pavimento rígido para un valor de $J = 3,8$ y un periodo de 20 años .....	155
40.	Gráfica resistencia vs. porosidad vs. tasa de infiltración .....	156
41.	Metodología para el cálculo de $C_s$ de acuerdo al mantenimiento y calidad del afluente .....	158
42.	Perfil para pavimento permeable de concreto asfáltico .....	163
43.	Ábaco para estimar el numero estructural de la carpeta asfáltica "a <sub>1</sub> " .....	164

44.	Ábaco para estimar el numero estructural de la carpeta asfáltica “a <sub>2</sub> ” .....	165
45.	Valores de porosidad vs. velocidad de infiltración para un pavimento asfáltico permeable .....	166
46.	Monograma para el diseño de pavimento asfáltico permeable .....	167
47.	Monograma para el diseño de pavimento asfáltico permeable .....	172
48.	Almacenamiento requerido para un pavimento en condiciones nuevas .....	176
49.	Almacenamiento requerido para una pavimento en condiciones renovadas .....	177
50.	Almacenamiento requerido para una pavimento en condiciones colmatadas.....	177
51.	Velocidad de infiltración de los sistemas permeables .....	180
52.	Matriz para la determinación de la eficiencia del sistema .....	181
53.	Espesores de diseño de pavimentos porosos.....	182

## TABLAS

I.	Cuencas hidrográficas de Guatemala .....	8
II.	Tipos de graduación para material de subbase o base granular.....	28
III.	Ensayos a material granular para capas subbase y base.....	30
IV.	Valores de carga unitaria para CBR.....	31
V.	Clasificación de suelos para infraestructura de pavimentos.....	32
VI.	Factores de distribución por carril .....	39
VII.	Periodos de diseño en función del tipo de carretera .....	39
VIII.	Valores de “R” de confiabilidad .....	40
IX.	Capacidad del drenaje para remover la humedad .....	45

X.	Valores $m_1$ recomendados para modificar los coeficientes estructurales de capa de bases y subbases sin tratamientos para pavimentos flexibles.....	50
XI.	Espesores mínimos en función de los ejes equivalentes (pulgadas) ....	51
XII.	Demanda diaria de agua del proyecto Progreso VII Derivada .....	73
XIII.	Características físicas del pozo Agua Zarca.....	74
XIV.	Características químicas del pozo Agua Zarca.....	75
XV.	Parámetros fisicoquímicos de las aguas superficiales.....	76
XVI.	Límites de toxicidad del pozo Agua Zarca .....	78
XVII.	Sustancias no deseadas del pozo Agua Zarca.....	78
XVIII.	Ensayos para agregados de concreto permeable.....	93
XIX.	Especificaciones para cementos asfálticos clasificados por su viscosidad a 60 °C .....	100
XX.	Variables meteorológicas del proyecto Progreso VII Derivada para el año 2009.....	129
XXI.	Clasificación de suelos del área de interés.....	131
XXII.	Coordenadas de los puntos de control .....	137
XXIII.	Tasas de infiltración para el área de interés .....	139
XXIV.	Aforo estimado de diseño .....	141
XXV.	Capacidad de estacionamientos.....	142
XXVI.	Periodo de diseño de carreteras.....	145
XXVII.	Factor de distribución por dirección .....	146
XXVIII.	Factor de distribución por carril.....	147
XXIX.	ESAL de diseño .....	148
XXX.	Valores de nivel de confiabilidad R .....	149
XXXI.	Valores de desviación estándar $S_o$ .....	150
XXXII.	Pérdida de serviciabilidad de carreteras .....	150
XXXIII.	Coeficiente de transferencia de carga J.....	151
XXXIV.	Coeficientes de drenaje .....	151

XXXV.	Resumen de los parámetros para pavimento permeable de concreto hidráulico .....	152
XXXVI.	Valores de almacenamiento para una tormenta con duración 24 horas .....	161
XXXVII.	Resumen de los parámetros para pavimentos permeables de concreto asfáltico .....	163
XXXVIII.	Valores de almacenamiento para una tormenta con duración 24 horas .....	169
XXXIX.	Especificaciones de diseño para mezclas Topmix .....	171
XL.	Resumen de los parámetros para pavimentos permeables Topmix ..	171
XLI.	Valores de almacenamiento para una tormenta con duración 24 horas .....	174



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>cm</b>	Centímetro
<b>E</b>	Este
<b>°C</b>	Grados Celsius
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>h</b>	Horas
<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	Kilogramo por centímetro cuadrado
<b>km</b>	Kilómetro
<b>km<sup>2</sup></b>	Kilómetro cuadrado
<b>psi</b>	Libra por pulgada cuadrada
<b>lt/s</b>	Litros por segundo
<b>lt/s/km<sup>2</sup></b>	Litros por segundo por kilómetro cuadrado
<b>±</b>	Más menos
<b>≥</b>	Mayor o igual que
<b>&gt;</b>	Mayor que
<b>Mpa</b>	Mega pascales
<b>≤</b>	Menor o igual que
<b>&lt;</b>	Menor que
<b>m</b>	Metro
<b>m<sup>2</sup></b>	Metro cuadrado
<b>m<sup>3</sup></b>	Metro cubico
<b>m<sup>3</sup>/año</b>	Metro cubico por año
<b>m<sup>3</sup>/d</b>	Metro cubico por día
<b>m<sup>3</sup>/h</b>	Metro cubico por hora

<b>m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año</b>	Metro cubico por kilómetro cuadrado por año
<b>msnm</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>μS/cm</b>	Micro siemens por centímetro
<b>μm</b>	Micrómetros
<b>mg/l</b>	Miligramo por litro
<b>mm<sup>2</sup>/s</b>	Milímetro cuadrado por segundo
<b>mm</b>	Milímetros
<b>mm/año</b>	Milímetros por año
<b>mm/d</b>	Milímetros por día
<b>mm/h</b>	Milímetros por hora
<b>mm/m</b>	Milímetros por minuto
<b>N/mm<sup>2</sup></b>	Newton por milímetro cuadrado
<b>N s/m<sup>2</sup></b>	Newton segundo por metro cuadrado
<b>N</b>	Norte
<b>Ω-m</b>	Ohm-metro
<b>%</b>	Porcentaje
<b>pH</b>	Potencial del hidrogeno
<b>plg</b>	Pulgada
<b>plg<sup>2</sup></b>	Pulgada cuadrada
<b>w/c</b>	Relación agua cemento
<b>s</b>	Segundos
<b>ton</b>	Toneladas
<b>und</b>	Unidades
<b>uPtCo</b>	Unidades de color en la escala de platino
<b>UNT</b>	Unidades nefelométricas

## GLOSARIO

<b>AASHTO</b>	American Association of State Highway and Transportation Officials.
<b>ACI</b>	American Concrete Institute.
<b>Agregado fino</b>	Material pétreo e inerte de gradación contenida de 3/8plg a 0,074mm, resultado de la desintegración de rocas.
<b>Agregado grueso</b>	Material pétreo e inerte de graduación retenida por el tamiz No. 4 y proveniente de la desintegración de rocas y por la trituración de gravas.
<b>Alcalinidad</b>	También llamada basicidad, es la capacidad ácido neutralizante de una sustancia química en solución acuosa.
<b>Aluvial</b>	Formación a partir de materiales que son arrastrados y depositados por corrientes de agua.
<b>ASTM</b>	American Society of Testing Materials.
<b>Cauce</b>	Concavidad de un terreno, de origen natural o artificial, por donde corre un río o cualquier corriente de agua.

<b>Caudal</b>	Cantidad de fluido que circula a través de una sección por unidad de tiempo.
<b>CBR</b>	California Bearing Radio.
<b>COGUANOR</b>	Comisión Guatemalteca de Normas.
<b>Concentración</b>	Cantidad en la que se encuentra las sustancias disueltas en relación a las sustancias que lo disuelven.
<b>Consolidación</b>	Proceso de reducción de volumen de los suelos finos cohesivos provocado por la acción de cargas sobre su masa.
<b>Cota</b>	Altura de un punto respecto al nivel del mar u otro plano de referencia.
<b>Cuarzo</b>	Mineral compuesto de sílice, de gran abundancia destacándose por su dureza y resistencia a la meteorización en la superficie terrestre.
<b>Densidad</b>	Relación entre la masa y el volumen de una sustancia.
<b>Disgregación</b>	Separación del agregado grueso de la mezcla fresca de concreto, ocasionada por el sobre mezclado.
<b>Estratos</b>	Masa de sedimentos, de espesores variables extendidos de forma horizontal y separada por otras capas similares.

<b>Falla geológica</b>	Fractura en el terreno de gran magnitud a lo largo del cual se han deslizado los dos bloques uno respecto del otro.
<b>Geología</b>	Ciencia que estudia el origen, formación y evolución de la tierra, los materiales que la componen y los mecanismos de formación.
<b>Hidrogeología</b>	Parte de la geología que estudia las aguas superficiales y subterráneas, así como su prospección, captación y protección.
<b>Hidrografía</b>	Parte de la geografía física que estudia y describe los mares, ríos, lagos y otras corrientes de agua.
<b>IGN</b>	Instituto geográfico nacional.
<b>INAB</b>	Instituto nacional de bosques.
<b>INDE</b>	Instituto nacional de electrificación.
<b>Infiltración</b>	Proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo a razón de un volumen por unidad de tiempo.
<b>INSIVUMEH</b>	Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología.

<b>Litología</b>	Parte de la geología que estudia las características de las rocas que aparecen constituyendo una determinada formación geológica.
<b>LMA</b>	Límite máximo aceptable. Valor de la concentración de cualquier característica del agua en el cual pasa a ser rechazado pero no sin que implique daños a la salud.
<b>LMP</b>	Límite máximo permisible. Valor de la concentración de cualquier característica del agua, arriba del cual el agua no es apta para el consumo humano.
<b>MAGA</b>	Ministerio de agricultura, Ganadería y Alimentación.
<b>MEM</b>	Ministerio de Energía y Minas.
<b>NGO</b>	Norma Guatemalteca Obligatoria
<b>Orografía</b>	Parte de la geografía que se encarga del estudio, descripción y representación del relieve terrestre.
<b>Pendiente</b>	Declive o inclinación de un terreno, representado como un porcentaje de la relación de la altura y la distancia horizontal del suelo.
<b>Periodo de diseño</b>	Periodo de tiempo en el cual una estructura o proyecto funcionará de manera segura y eficiente para el cual fue diseñado.

<b>Periodo de retorno</b>	Probabilidad de ocurrencia que un evento determinado vuelva a suceder con máxima intensidad.
<b>Permeabilidad</b>	Capacidad de un material de permitirle a un fluido que lo atraviese sin alterar su composición.
<b>Pozo de absorción</b>	Es un agujero excavado en el suelo, relleno de material permeable que facilita la filtración del agua en el suelo.
<b>Prueba triaxial</b>	Método de medición de las propiedades mecánicas de suelos bajo cargas, para la determinación de la capacidad cortante.
<b>PVC</b>	Cloruro de polivinilo. Producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo utilizado en la fabricación de tubería para la conducción de fluidos.
<b>Relación agua-cemento</b>	Parámetro que relaciona el agua y el cemento en una mezcla de concreto expresada como un cociente de la misma y que está directamente ligada a la resistencia del hormigón.
<b>Relación de vacíos</b>	Volumen de un suelo no ocupado por partículas sólidas. Cuanto mayor sea, más suelto será el suelo.
<b>Roca ígnea</b>	Son rocas formadas por solidificación de un material rocoso, caliente y móvil denominado magma, en un proceso llamado cristalización, el cual resulta del

enfriamiento de los minerales y del entrelazamiento de sus partículas.

**Roca metamórfica**

Rocas formadas por la modificación de otras ya existentes en el interior de la tierra por un proceso llamado metamorfismo. A través de calor y presión sufren cambios en su composición estructural y mineralógica.

**Roca sedimentaria**

Son rocas formadas por la acumulación de sedimentos, formados a partir de diversos tamaños de partículas, transportadas por agua, hielo o viento que posteriormente son sometidas a procesos físicos y químicos (Diagénesis) que dan lugar a materiales consolidados.

**SEV**

Sondeo eléctrico vertical. Prueba utilizada para conocer la distribución de resistividad del suelo. Dadas las propiedades eléctricas de los materiales ya conocidos, producen líneas de campo constantes para materiales homogéneo, es por ello cuando estos campos varían se pueden aducir cambios de estos materiales y deducir así por estos valores, la composición en el subsuelo.

## RESUMEN

El desarrollo de esta investigación consta de tres partes: una teórica, que comprende la búsqueda y compilación de material que conforma el marco teórico; una práctica, en la que se desarrollara una prueba de campo para determinar la tasa de filtración para el tipo de suelo seleccionado; y otra experimental en la que se diseñó un pavimento con las características de la mezcla asfáltica Topmix, para una función específica. Se compararan con las tecnologías comunes en el campo de la construcción y se definen los modelos de viabilidad e implementación.

La investigación de campo está dirigida al diseño de un pavimento permeable, por lo en principio se recolectó literatura básica de hidrología superficial y pavimentos. Esta información está contenida en el capítulo 1.

El capítulo 2 consta de la descripción de la hidrogeología de nuestra área de interés, la microcuenca del río Los Achiotos, que forma parte del sistema hidrográfico de la cuenca del río Motagua. Esta última pertenece a la vertiente del Atlántico, considerada entre las cuencas más grandes de nuestro país.

Los capítulos 3 y 4 son referentes a concretos permeables. En el capítulo 3, se tomó como base las normas para el diseño de pavimentos permeables de concreto hidráulico (ACI-522) y mezcla asfáltica, (AASTHO-93), como parte teórica del trabajo necesario para describir los pavimentos permeables en general. En el capítulo 4 hace a una referencia general mezcla Topmix, sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como sus mecanismos de

funcionamiento y especificaciones importantes para lograr su buen funcionamiento.

El desarrollo de la parte práctica y experimental está plasmado en el capítulo 5. Para la parte práctica, se analiza la implementación de la mezcla asfáltica Topmix, por lo que fueron realizadas pruebas de filtración de campo. Debido a que la finalidad de las mezclas permeables es dejar pasar la mayor cantidad de agua al suelo para que se infiltre, es necesario para el diseño, saber la velocidad de filtración del agua. La parte experimental muestra, con base en los resultados de campo, la propuesta con la mezcla Topmix para la construcción de un área de parqueo, encaminamientos y áreas de recreación para los trabajadores de Exploraciones Mineras de Guatemala, S.A. para dar una solución viable y sostenible con base en el impacto ambiental en la región.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Proponer un sistema de filtración pluvial a través de la mezcla Topmix para las condiciones hidrogeológicas del proyecto minero Progreso VII Derivada, brindando una solución sostenible para minimizar el impacto ambiental.

### **Específicos**

1. Realizar modelos de comparación con las tecnologías existentes y el Topmix.
2. Realizar un modelo de funcionamiento del Topmix con las condiciones regionales locales para predecir su eficiencia.
3. Obtener los valores en campo de filtración del suelo donde se aplicará el Topmix.
4. Proponer una solución eficiente y técnica que cumpla con los requerimientos estructurales requeridos.
5. Proponer una nueva tecnología de construcción dentro de Guatemala que pueda ser desarrollada como solución al cambio climático.



## INTRODUCCIÓN

El considerable aumento de nuevas construcciones trae consigo un impacto ambiental en la hidrogeología del área donde se desarrollen. Como resultado se pierden áreas descubiertas de terreno que servían para la filtración natural al manto freático y, por consiguiente, a la recarga hidráulica de las reservas de agua subterránea. Se altera así la hidrología natural, por lo que se interrumpe de forma notable el ciclo hidrológico.

El aumento del caudal de escurrimiento en la temporada de lluvias es uno de los problemas más visibles en nuestro país, ya que a mayor cantidad de área construida aumenta el área de escurrimiento. Esto lleva a que se transporte un mayor caudal hacia tragantes, causando que muchos rebasen sus capacidades de diseño.

La disminución de la capa freática es otra problemática preocupante, ya que se encuentra a mayor profundidad; por consiguiente, la cantidad de agua que llega de pozos perforados es menor. Todo esto ha llevado a los ingenieros a proponer soluciones constructivas y a nivel de infraestructura, como los pozos de absorción, y aumentar las áreas verdes.

Una solución inmediata a esta problemática es el concreto permeable. Este se diferencia del concreto estructural en que este no permite la filtración de líquido una vez se vuelve monolítico. Posee una alta porosidad respecto al estructural, por lo que su absorción es poca porque la finalidad es que pase la mayor cantidad de agua posible. Este tipo de concreto es muy ligero y de poco grado de

compactación, tiene un alto porcentaje de contenido de vacíos y puede ser hecho de concreto hidráulico o asfáltico.

Una innovación en este campo, desarrollada por la empresa británica TARMAC, es la denominada mezcla Topmix, que ofrece una velocidad de drenaje de entre 150 y 1 000 L/min/m<sup>2</sup>. Son valores superiores a los de las demás mezclas asfálticas permeables e incluso a los pavimentos de mezclas de concreto hidráulico. Comparada con la mezcla estándar, tiene un alto grado de resistencia a la fricción, lo que lo hace realmente bueno para parqueos, encaminamientos, vías urbanas y hasta para subbase de carpeta asfáltica. El agua que entra en contacto con este concreto se almacena bajo dicha capa hasta que comienza a evaporarse, lo que ayuda a mantener el agua en reposo para propiciar la filtración a estratos inferiores.

La licencia de explotación minera Progreso VII Derivada ha sido el resultado de programas de exploración regional en los municipios de San José del Golfo y San Pedro Ayampuc, del departamento de Guatemala. Son desarrollados por Exploraciones Mineras de Guatemala, S.A. desde el año 2001. Tiene como principal objetivo la extracción y procesamiento de oro y plata en la región.

Progreso VII Derivada en su estudio de impacto ambiental se propone el desarrollo de toda la infraestructura y las medidas de mitigación para cada una de las áreas por trabajar. Este trabajo de graduación propone la aplicación de Topmix para la construcción de un área 7,367 m<sup>2</sup>, enfocada en la construcción de pavimentos 100 % permeables que permiten la libre circulación del agua para no alterar el ciclo hidrológico de la región.

# 1. CONCEPTOS GENERALES

## 1.1. Conceptos generales de hidrología

La hidrología es el estudio de los estados del agua y sus influencias en el entorno de los seres vivos.

Para Guatemala podemos definirla como el estudio del comportamiento del ciclo del agua y sus repercusiones en nuestro medio y entorno.

### 1.1.1. Cuenca hidrológica

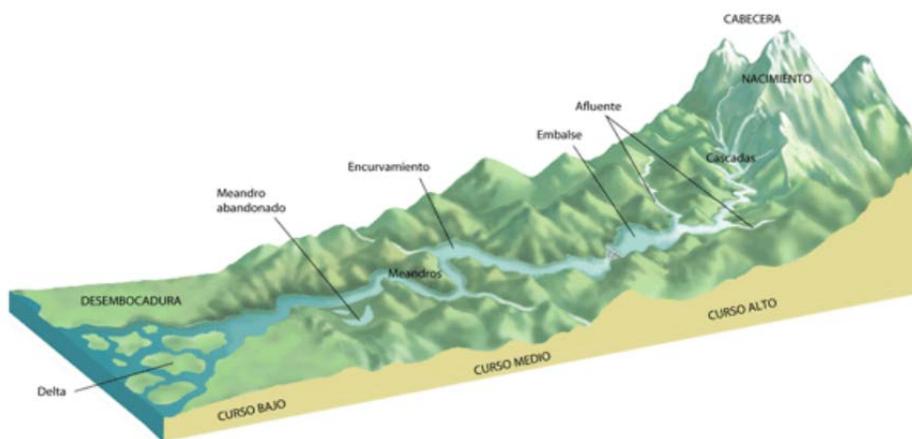
La cuenta es una zona de la superficie terrestre donde toda el agua que cae es drenada hacia un mismo punto de salida. También podemos decir que es una depresión natural, delimitada por un grupo de elevaciones naturales que obligan a toda el agua dentro de esta área a tomar un mismo punto de salida.

A continuación, se mencionan algunas de las características más relevantes de una cuenca:

- Área de la cuenca: es la cantidad de superficie dentro de una cuenca. Sirve de base para la determinación de otros elementos (parámetros, coeficientes, relaciones, entre otros). Por lo general, los caudales de escurrimiento crecen en medida que aumenta la superficie de la misma. En las regiones contiguas al parteaguas de la cuenca, esta se ve afectada por el incremento o disminución del área por constantes deslaves, que causan el incremento de área en una cuenca, pero disminuyen en la otra.

- Corriente principal: también conocida como el cauce principal, es la corriente que pasa por la salida de la cuenca. Es la de mayor caudal y mayor longitud, ya que está presente desde la parte alta hasta la parte baja de la cuenca.

Figura 1. **Corriente principal de una cuenca**



Fuente: Sociedad Geográfica de Lima. *¿Qué es cuenca hidrológica?* p. 12.

- Corriente tributaria: recibe el nombre también de cauces secundarios. Es cualquier desembocadura en la corriente principal y que está delimitada dentro de una subcuenca.

Así mismo se puede encontrar un tipo de clasificación de corrientes: las permanentes, efímeras e intermitentes. Las permanentes son aquellas que siempre llevan agua sin importar en qué época del año se encuentre. Las efímeras son las que aparecen únicamente cuando ocurre precipitación y las intermitentes son las que llevan agua en alguna época del año.

- Curva de nivel: línea trazada en el mapa que indica la altura del terreno. Los puntos de una misma línea indican la misma altitud.
- Orden de corrientes: también llamada clasificación de corrientes. Dependiendo de su importancia y desembocadura es el método de Horton en 1945, el cual clasifica los cauces según la cantidad de ramificaciones que lo alimentan.

Figura 2. **Parte aguas de una cuenca**

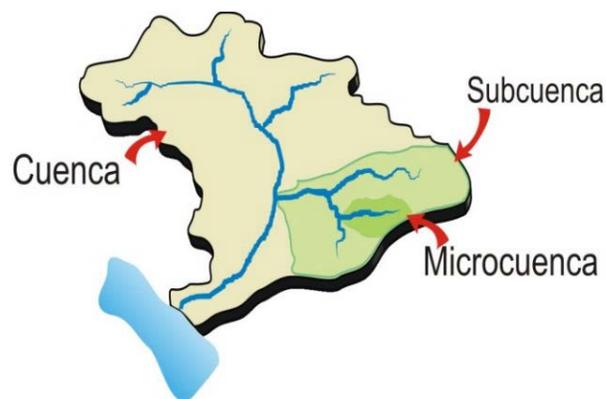


Fuente: Sociedad Geográfica de Lima. *¿Qué es cuenca hidrológica?* p.12.

- Parte aguas: es la línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico o de mayor cota, y que esta a su vez separa la cuenca con cuencas vecinas.
- Pendiente: relación entre el desnivel de la cuenca y la longitud promedio de la misma.
- Cuenca, subcuenca y microcuenca: una cuenca está compuesta de subcuencas y microcuencas, cuya variante radica en el tamaño de las

mismas. Una subcuenca es conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente y que además son el área de drenaje de una corriente tributaria. Una microcuenca es toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una subcuenca. Así, una subcuenca está dividida en varias microcuencas.

Figura 3. **Cuenca, subcuencas y microcuencas**

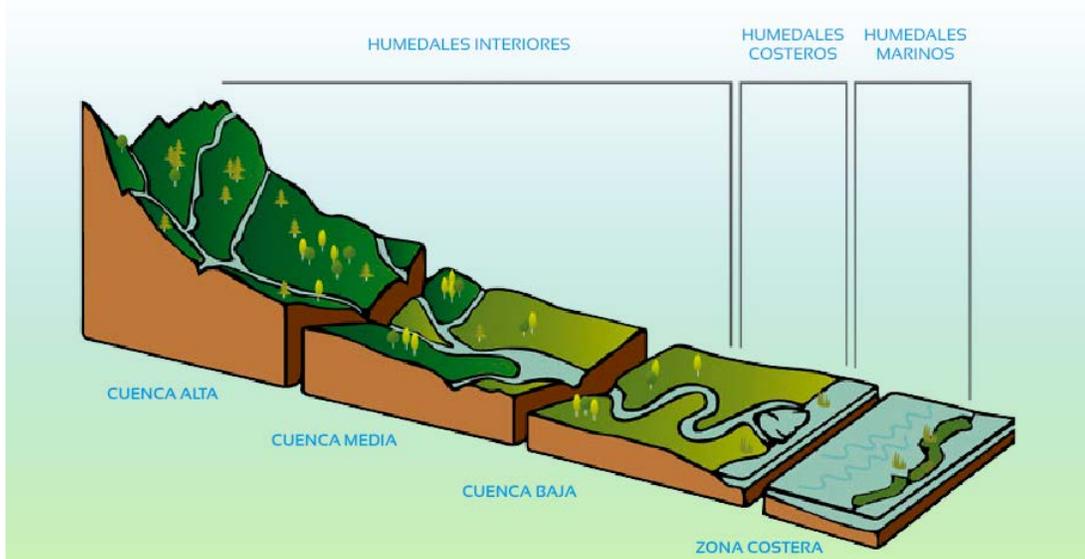


Fuente: Sociedad Geográfica de Lima. *¿Qué es cuenca hidrológica?* p.9.

- Partes de la cuenca: una cuenca está comprendida por tres áreas muy significativas, la parte alta, media y baja. La parte alta de una cuenca corresponde generalmente a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por las divisorias de aguas. Se caracteriza por tener pendientes muy elevadas y con velocidades muy altas. La cuenca media es donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas y el río principal mantiene un cauce definido. Esta área es conocida como la más segura, ya que está libre de inundaciones. La parte baja son las zonas transicionales, donde el río desemboca a ríos mayores o a zonas bajas, tales como estuarios y humedales. Esta zona está

expuesta a inundaciones y a velocidades de cauce muy bajas. En la figura 4 se ilustra cada una de las partes que conforman una cuenca.

Figura 4. Partes de una cuenca



Fuente: Agua y ambiente. *Prevención de riesgos en cuencas hidrológicas.*

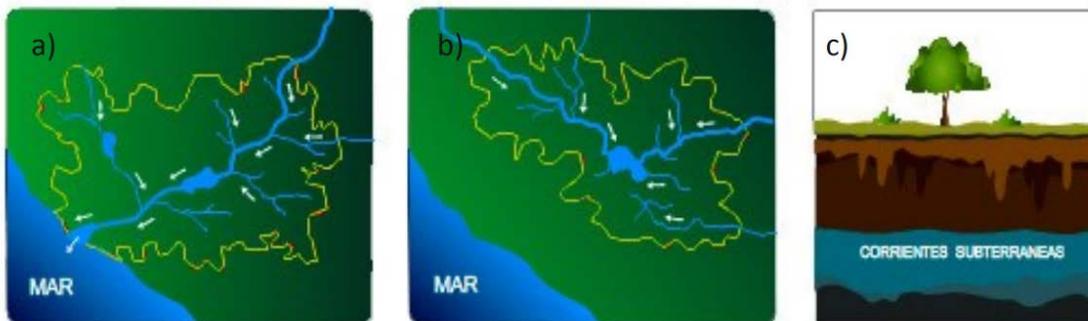
<https://aguayambiente.com/2018/03/02/prevencion-riesgos-cuencas-hidrológicas-escurrimiento/>.

Consulta 3 de julio de 2020.

- Tipos de cuencas: las cuencas se clasifican de acuerdo con la región en donde se encuentran, la topografía de la cual están compuestas y por la forma en la que funcionan. Además, esta información es importante considerarla para la realización de estudios, ya sea para la construcción de distintos tipos de proyectos como hidroeléctricas, puentes, carreteras o para explotar el recurso hídrico como conducciones de agua potable. Partiendo de lo anterior podemos clasificarla en endorreicas y exorreicas. Las primeras son las que drenan sus aguas a un lago y las cuencas exorreicas son las que drenan sus aguas hacia un cauce de un río mayor

el cual tiene sus afluentes. En la figura 5 podemos identificar mejor esta clasificación.

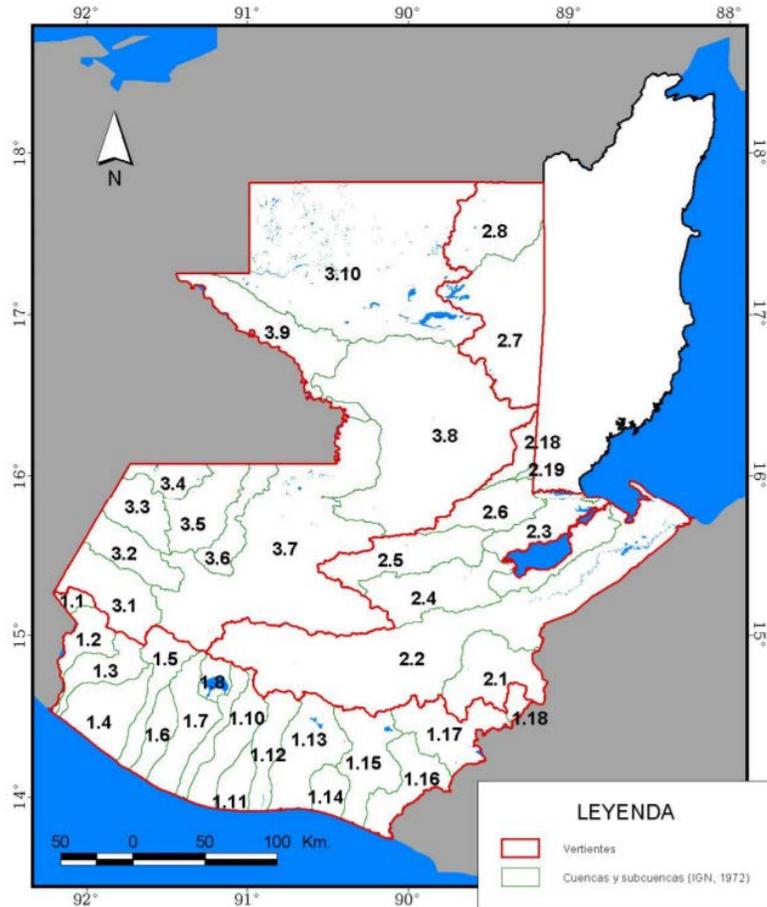
Figura 5. **Tipos de cuencas**



Fuente: Sociedad Geográfica de Lima. *¿Qué es cuenca hidrológica?* p.15.

Para la planificación de proyectos es importante conocer factores como el caudal. Este indica el volumen de fluido que pasa por un punto en un tiempo determinado, lo cual es utilizado frecuentemente en estudios para construcciones de abastecimiento de agua potable. También, por medio del caudal, se conoce la cantidad de agua a la cual se posee acceso y, de esa forma, se diseñan las redes de conducción y de distribución. Igualmente, dicho caudal puede ser utilizado en la construcción de puentes. Con esta información del caudal junto al hidrograma, se puede conocer la crecida máxima de un río, y basado en esos datos se realiza el diseño.

Figura 6. Mapa de cuencas hidrográficas de Guatemala



Fuente: Instituto Geográfico Nacional. *Cuencas de Guatemala*. p.10.

Según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), en Guatemala existen 38 cuencas hidrográficas, las cuales están divididas en tres vértices: del Pacífico, del Atlántico y del Golfo de México.

Tabla I. **Cuencas hidrográficas de Guatemala**

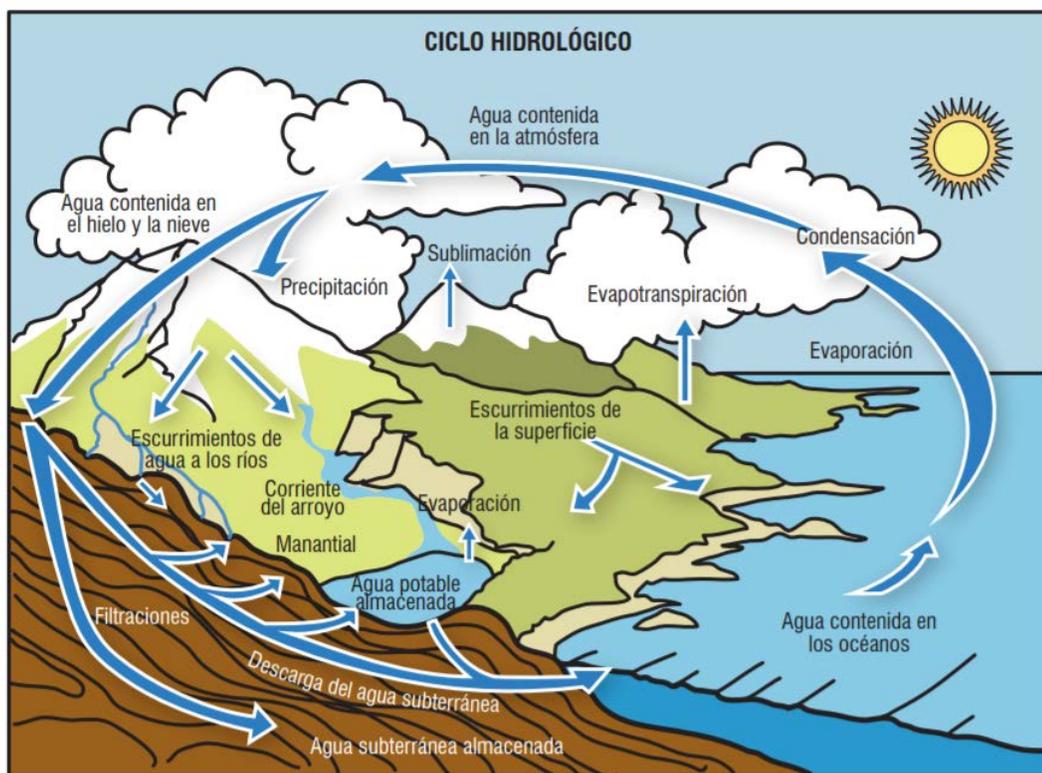
No.	Cuenca	Extensión km <sup>2</sup>	No.	Cuenca	Extensión Km <sup>2</sup>
1.1	Coatán	269	2.1	Grande de Zacapa	2 471
1.2	Suchiate	1 064	2.2	Motagua	12 719
1.3	Naranjo	1 266	2.3	Izabal – Río Dulce	3 448
1.4	Ocosito	2 024	2.4	Polo chic	2 822
1.5	Samalá	1 499	2.5	Cahabón	2 248
1.6	Sis - Iacán	914	2.6	Sarstún	2 117
1.7	Nahualate	2 012	2.7	Mopán - Belice	10 945
1.8	Atitlán	548	2.8	Hondo	6 788
1.9	Madre Vieja	905	2.18	Moho	1 583
1.10.	Coyolate	1 616	2.19	Temans	385
1.11.	Acomé	764	3.1	Cuilco	2 274
1.12.	Achiguate	1 322	3.2	Selegua	1 535
1.13.	María Linda	2 759	3.3	Nentón	1 451
1.14.	Paso Hondo	509	3.4	Pojom	813
1.15.	Los Esclavos	2 258	3.5	Ixcán	2 085
1.16.	Paz	1 722	3.6	Xaclbal	1 366
1.17.	Ostúa - Güija	2 231	3.7	Salinas	12 150
1.18.	Olopa	308	3.8	Pasión	12 156
			3.9	Usumacinta	2 638
			3.1	San Pedro	14 335

Fuente: elaboración propia, empleado Excel.

### 1.1.2. Ciclo hidrológico

Se denomina ciclo hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente, primero por las precipitaciones y después en forma de esorrentía superficial y subterránea.

Figura 7. **Ciclo hidrológico**



Fuente: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia.

*Estudio nacional del agua. p.36.*

Como se trata de un ciclo podríamos considerar todas sus fases, al iniciar en la precipitación y considerar qué caminos puede seguir el agua que cae sobre los continentes en las precipitaciones:

Dentro del ciclo hidrológico tiene cabida varios procesos que hacen que este sea posible. Dentro de los más relevantes podemos mencionar:

- Evaporación
- Condensación
- Precipitación
- Infiltración
- Escorrentía

El ciclo hidrológico es muy valioso para la tierra y la vida que en ella habita; así mismo, es el encargado de determinar la variación climática e incide en el nivel de los ríos, lagos, mares y océanos. El mal manejo del ciclo del agua ha llevado a cambios climáticos y contaminación en la biosfera, poniendo en riesgo la distribución del agua y la vida en la tierra.

#### **1.1.2.1. Precipitación**

Son todas las formas de humedad emanada de la atmósfera y depositada en la superficie de la tierra. Tiene lugar cuando el agua condensada en la atmósfera desciende a la superficie en forma de pequeñas gotas. En las regiones más frías del planeta, sin embargo, el agua pasa del estado líquido al sólido, y se precipita como nieve o granizo. Posteriormente, cuando se produce el deshielo, el agua volverá a estado líquido, dando paso al ciclo normal del agua.

Para que se produzca la precipitación se requiere la elevación de una masa de agua a la atmósfera, de tal manera que al enfriarse parte de esa humedad se condensa. A continuación, se presenta una clasificación de los diferentes tipos de precipitación.

- Precipitación conectiva: es muy común de los trópicos. Se caracteriza por muy intensa y de corta duración y se concentra en pequeñas áreas. Se produce por el calentamiento de las masas de aire cercano a la superficie y que sube a la disminución de su densidad. Al ascender, masas de aire más frío y denso tratan de reemplazar al más cálido. Esta interrupción generalmente crea un descenso muy brusco en la temperatura de las masas de aire, creando condensación y una precipitación muy intensa.
- Precipitación orográfica: sucede en las montañas. Por el choque de las masas de aire húmedo asciende con una barrera de origen natural, lo cual produce una precipitación en esta región.
- Precipitación de convergencia: se produce cuando dos masas de aire de aproximadamente la misma temperatura se dirigen a direcciones opuestas una de la otra y al chocar hacen que ambas se eleven, produciendo precipitaciones.
- Precipitación ciclónica: es muy común de Guatemala, sobre todo en la estación lluviosa. Se produce cuando una masa de baja presión gira en forma circular alrededor de un eje (conocido como ojo del ciclón) en dirección contraria a las manecillas del reloj. Esto crea un efecto de succión de aire superficial, llevándolo hacia arriba del sistema y condensando la humedad del aire que ascendió. Este efecto es el que crea los huracanes y tormentas tropicales.

#### **1.1.2.2. Evaporación**

El ciclo del agua comienza con la evaporación. Esto ocurre cuando el sol calienta la superficie de las aguas de los ríos, lagos, lagunas, mares y océanos.

El agua, entonces, se transforma en vapor y sube a la atmósfera a un punto de mayor presión. La radiación solar es clave para producir este efecto.

A nivel molecular, la evaporación sucede debido al aumento de energía cinética lo que provoca que las moléculas de agua se separen una de la otra. Su energía es tal que salen disparadas a la atmósfera.

Actualmente se utiliza evaporímetros para medir la evaporación. Son muy precisos para obtener datos. Básicamente se tratan de un pequeño tanque de almacenamiento de agua donde se llena parcialmente y se mide los milímetros que se han evaporado. La escala está fijada de tal manera que no sea posible moverla. Debido a que el agua se evapora más rápidamente en fuentes pequeñas que en grandes, existen varios factores de corrección.

### **1.1.2.3. Evapotranspiración**

Es la consideración de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración. Esta última es debida al flujo del agua en las plantas. La manera de análisis de la evapotranspiración es debida a que es difícil medir la transpiración de las plantas y lo que realmente interesa es la cantidad de agua que se evapora sin importar la vía que esta tome. Las unidades de medida son los milímetros (mm).

Este factor es determinante para la cuantificación de los recursos hídricos de una región; es decir, el volumen de agua disponible será igual a la diferencia de la lluvia caída y lo que se evapotranspira. También es de vital importancia ya que en base a este dato se determina el tipo de diseño para presas, sistemas de riego y abastecimientos de agua potable. Los factores intrínsecos que lo rigen están son el grado de humedad del suelo, tipo de planta, estación del año y las

variaciones interanuales (es decir, cuando las plantas están en crecimiento o retoñando, ya que la transpiración es alta).

#### **1.1.2.4. Infiltración**

Se conoce como infiltración al proceso en el cual el agua que ha caído en la superficie terrestre, como consecuencia de las precipitaciones, penetra en el suelo. Una parte es aprovechada por la naturaleza y los seres vivos, mientras que la otra se incorpora a las aguas subterráneas. Alguna de esta agua emana inmediatamente y otra en menor cantidad pasa a formar parte de las reservas de agua subterránea del planeta.

La infiltración es toda aquella agua que no ha sido evaporada, almacenada ni captada en lagos, lagunas, ríos, riachuelos, entre otros. Y que se ha quedado en el suelo, donde ha penetrado por la capilaridad y la fuerza de gravedad.

La tasa de infiltración en los suelos es la tasa de penetración del agua a través del suelo en un periodo de tiempo; si el exceso de precipitación es igual o mayor a cero, la capacidad de infiltración llega a su máximo, de lo contrario, se afirma que el suelo que no ha llegado a su máxima capacidad.

#### **1.1.2.5. Escorrentía**

Esta fase comprende el desplazamiento del agua a través de la superficie, gracias a los declives y accidentes del terreno, para entrar de nuevo en los ríos, lagos, lagunas, mares y océanos, lo que constituye la vuelta al inicio del ciclo. La escorrentía es el principal agente geológico de erosión y transporte de sedimentos y minerales de la superficie.

Si la intensidad de la lluvia es mucho mayor que la capacidad de infiltración del suelo, se produce escorrentía. Aunque la intensidad sea constante y menor a la capacidad de infiltración del suelo, si la duración de la lluvia es alta, el suelo será incapaz de infiltrar toda el agua y se producirá escorrentía.

### **1.1.3. Balance hídrico**

En el contexto del presente estudio, el balance hidrológico se define como una herramienta que permite describir el movimiento de los flujos de agua dentro del ciclo hidrológico en su expresión puramente biofísica; es decir, sin tomar en cuenta los aspectos relacionados con el manejo y la extracción del recurso por la sociedad.

“El término balance hidrológico se diferencia del balance hídrico, pues el segundo generalmente consiste en un balance entre la oferta de agua determinada por el subsistema natural y la demanda por parte de las sociedades humanas”<sup>1</sup>.

La ecuación del balance se simplifica así:

$$\text{Precipitación} = \text{ET} + (\text{Escorrentía Sup.} + \text{Escorrentía Sub.})$$

La precipitación es igual a la suma de la evapotranspiración, escorrentía superficial y escorrentía subterránea, pues del agua de lluvia que cae en el suelo, una parte es filtrada hacia el manto freático y otra parte es la escorrentía, la cual alimenta los ríos, lagos y mares: esta es evaporada, sube a la atmósfera, se

---

<sup>1</sup> SAUBES, Nils. *Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala, base fundamental para la gestión del agua con visión a largo plazo.* p.9.

condensa y cae de nuevo a la superficie mediante la precipitación y, de esa forma, se repite el ciclo hidrológico.

#### **1.1.4. Tormentas de diseño**

Las tormentas de diseño sirven para conocer la cantidad de lluvia que puede caer en un área determinada; esto, sumado a los estudios de las cuencas, se utiliza para saber la cantidad de agua que puede alimentar a un río en un tiempo determinado. De la misma manera, estos estudios son utilizados frecuentemente en el diseño de redes de drenaje pluvial, para carreteras, hidroeléctricas y puentes.

##### **1.1.4.1. Relaciones intensidad-duración-frecuencia**

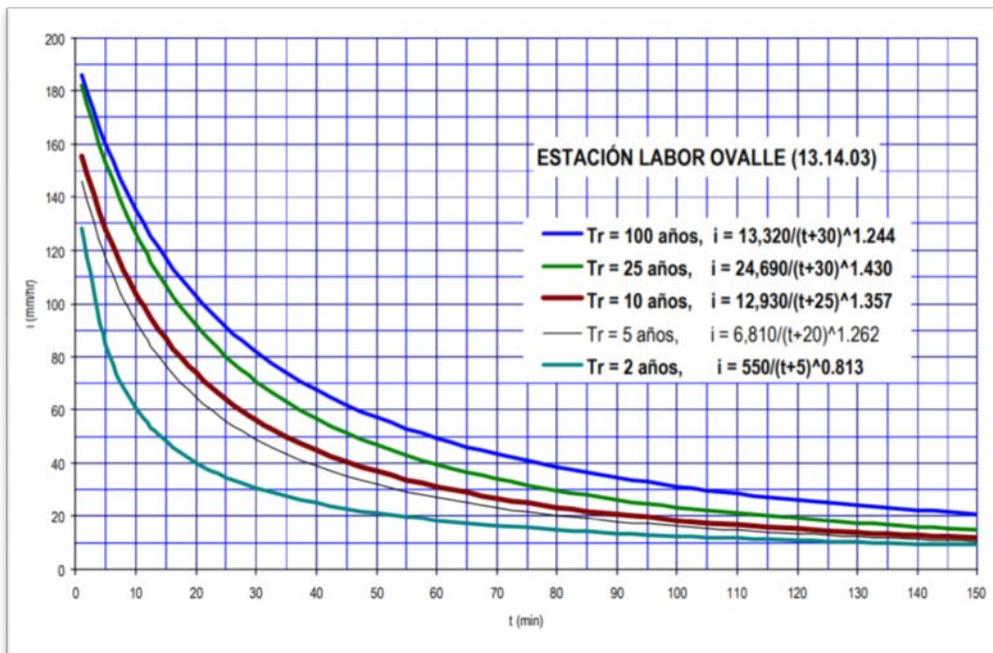
La intensidad es la cantidad de lluvia que cae en determinado periodo de tiempo; la duración se define como el periodo de tiempo desde que inicia hasta que finaliza la precipitación y la frecuencia es la ocurrencia con la que un evento tiene presencia.

La precipitación, como variable del estado hidrológica, se puede caracterizar a través de la intensidad, su duración y su frecuencia o probabilidad de ocurrencia. Para caracterizarla es necesario un gran número de observaciones, extraídas de series pluviográficas, con el objetivo de deducir el patrón de comportamiento en una zona determinada y permitir un análisis.

La determinación numérica de la intensidad se realiza utilizando curvas regionales de intensidad-duración-frecuencia o curvas IDF. Cuando la cuenca está bien instrumentada, las curvas IDF se obtienen de análisis de frecuencias de lluvias máximas registradas, pero con cuencas con información escasa es

necesario aplicar métodos empíricos con base a registros de lluvias máximas diarias. Estas se obtienen de estudios regionales o mediante transposición de lluvias de cuencas de características similares.

Figura 8. **Curva Intensidad duración frecuencia**



Fuente: INSIVUMEH. *Familia de curvas intensidad-duración-frecuencia para la estación Labor Ovalle.* p.8.

Conocer las precipitaciones y su distribución temporal es motivo de interés para diversos fines; por ejemplo, para la generación de energía, el abastecimiento de agua doméstica o para determinar el tiempo de retorno para el diseño de obras civiles; es decir, la probabilidad de que vuelva a suceder ese evento (evento en estudio) de máxima intensidad.

### 1.1.5. Aguas subterráneas

Una parte de la precipitación caída (en forma de lluvia, nieve o granizo) discurre por la superficie terrestre formando arroyos y ríos, lo que constituye la escorrentía superficial. “Otra parte se infiltra en el terreno, rellenando poros y fisuras; cuando éstos se saturan, el agua fluye por gravedad hacia los manantiales, ríos o mares, dando lugar a la escorrentía subterránea”<sup>2</sup>

Acerca de la distribución del agua subterránea, las aguas superficiales se infiltran en el terreno por los poros y las grietas del suelo, hasta llegar a una cierta profundidad, en la cual todos los huecos están repletos de agua. Del mismo modo, esta zona se llama zona de saturación o capa freática. También, su límite superior se denomina superficie de saturación o superficie freática:

La figura 9 representa una zona de aguas suspendidas y retenidas por una ligera capa impermeable. Los pozos que atraviesan sólo la zona de aguas suspendidas, suministran muy poco caudal (pozo A). Igualmente, si se profundiza hasta atravesar la zona impermeable (pozo B), el pozo se seca, debido a que su agua se pierde en la zona permeable del fondo. Asimismo, cuando el pozo llega a la zona de saturación, el agua mana con abundancia (pozo C).

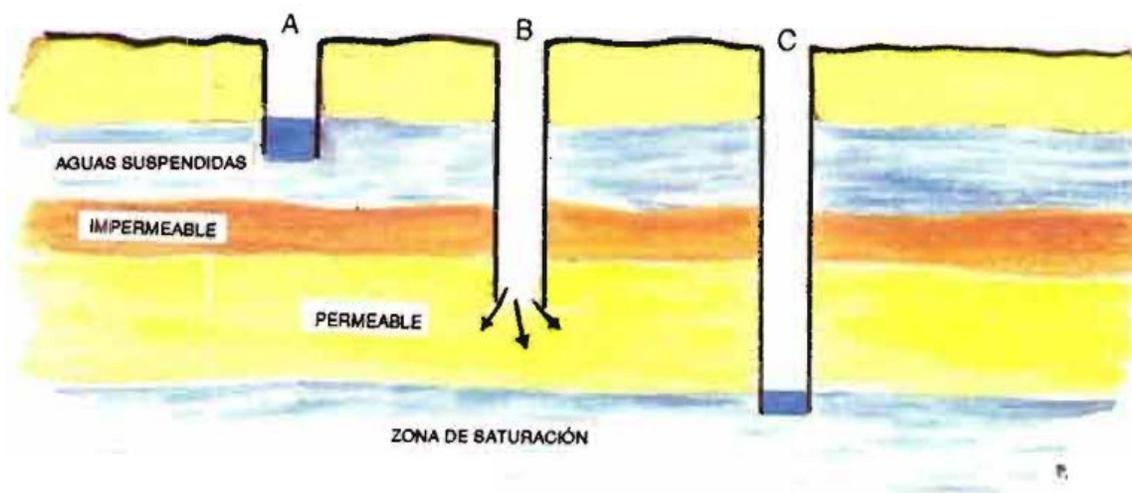
El suelo está compuesto por distintas capas, estas pueden ser permeables, semipermeable e impermeables, dependiendo del tipo de suelo, es la cantidad de agua proveniente de las precipitaciones la que se puede filtrar hacia el manto freático. Cuando el suelo se satura o es suelo impermeable, se produce la escorrentía superficial. Además, otro factor, el cual propicia la escorrentía superficial, es la eliminación de la capa vegetal o tala de árboles, esto último resulta en desastres como inundaciones.

---

<sup>2</sup> YAGUE, Juan Luis. *Aguas subterráneas*. p.2.

Los acuíferos son las formaciones geológicas que contienen agua subterránea. Desde un punto de vista práctico, un acuífero ha de ser capaz de almacenar y transmitir agua en cantidad susceptible de ser explotada económicamente.

Figura 9. **Distribución de las aguas subterráneas**



Fuente: YAGUE, Jorge. *Aguas Subterráneas*. p.2.

El caudal de entrada o recarga de agua está constituido, generalmente, por el agua infiltrada procedente de precipitaciones, aguas superficiales, riego, aguas residuales, etc. El tipo y la configuración de cada acuífero dependerán en gran medida de las condiciones propias del área como la geología y la climatología, dentro de las formas que podemos clasificar los acuíferos podemos mencionar:

Según las características litológicas o tipo de huecos, los acuíferos se dividen:

- **Acuíferos detríticos:** son acuíferos de rocas o sedimentos detríticos. Su permeabilidad se debe a la porosidad intergranular (de tipo primario). Si las rocas están parcialmente consolidadas o cementadas, la porosidad puede ser además de tipo secundario, por fisuración, disolución. Son todos los materiales con tamaño de grano de arena: arenas, arcosas, areniscas, gravas, conglomerados, entre otros.
- **Acuíferos fisurados o kársticos:** corresponden a los acuíferos en rocas carbonatadas (calizas/dolomías) o bien otro tipo de rocas que presenten diaclasado, fracturación o disolución (rocas ígneas, metamórficas, detríticas bien consolidadas). Poseen permeabilidad debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución. Se encuentran entre las calizas, dolomías, yesos, granitos, basaltos, siendo los dos primeros los tipos más importantes.
- **Acuíferos mixtos:** su porosidad se debe a un conjunto de todas las anteriores causas. Un ejemplo pueden ser las arenas calcáreas o calcarenitas.

Según las presiones hidrostáticas los acuíferos se pueden clasificar:

- **Acuíferos libres:** también llamados no confinados o freáticos. Entre ellos existe una superficie libre y real del agua almacenada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica. Entre la superficie del terreno y el nivel freático se encuentra la zona no saturada. La superficie hasta donde llega el agua, se denomina superficie freática; cuando esta superficie es cortada por un pozo se habla de nivel freático en ese punto.

- **Acuíferos confinados:** también llamados cautivos, a presión en carga. En ellos el agua está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. Si se extrae agua de él, ningún poro se vacía, solo disminuye la presión del agua. Al disminuir la presión, pueden llegar a producirse asentamientos y subsidencias del terreno. En ellos no existe zona no saturada. En el caso de que se perforase este tipo de acuíferos, el nivel de agua ascendería hasta situarse en una determinada posición que coincide con el nivel de saturación del acuífero en el área de recarga; a este nivel se le conoce con el nombre de nivel piezométrico. Si unimos todos los niveles piezométricos, obtendremos la superficie piezométrica (superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría el agua si se hicieran infinitas perforaciones en el acuífero).
- **Acuíferos semiconfinados:** son más frecuentes que los acuíferos confinados, pudiendo afirmar que se trata de acuíferos a presión, pero en algunas de las capas confinantes son semipermeables, acuitados.
- **Acuíferos colgados:** se producen ocasionalmente cuando, por efecto de una fuerte recarga, asciende el nivel freático quedando retenida una porción de agua por un nivel inferior impermeable.
- **Acuíferos multicapas:** son un caso particular (y frecuente) de acuíferos en los que se suceden niveles de distinta permeabilidad.

Las aguas subterráneas en Guatemala, según el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), en su evaluación del potencial de aguas subterráneas en Guatemala en el 2011, afirma que solo el 26 % del territorio tiene alto potencial de agua subterránea, mientras que el 47 % es pobre o muy pobre.

Las áreas de mayor disponibilidad se concentran en las llanuras aluviales cuaternarias de la costa sur y otras planicies aluviales. Además, Los acuíferos más estudiados son el valle de Guatemala, Quetzaltenango y el río Ostua, pero en general, hace falta un estudio hidrogeológico a detalle, para clasificar mejor los acuíferos del país. Diferentes estudios estiman el volumen disponible anual de agua subterránea en alrededor de 30 000 millones de m<sup>3</sup>.

La contaminación del agua subterránea puede ser natural o artificial. La contaminación artificial es creada por la actividad humana, mediante la producción de desechos domiciliarios, industriales, mineros o agropecuarios.

Algunas actividades agropecuarias producen una cantidad considerable de contaminación en los acuíferos, debido a la utilización de productos químicos como herbicidas, insecticidas o abonos, los cuales producen residuos que se alojan en el suelo. Así, cuando se presentan lluvias, el agua filtrada en el suelo arrastra los residuos de los químicos y contamina los acuíferos. Igualmente, de forma similar, se producen contaminaciones en áreas industriales y domiciliarias.

#### **1.1.5.1. Recarga hídrica**

La recarga hídrica es el proceso por el cual se incorpora a un acuífero, agua procedente del exterior, “Además se define este fenómeno como el proceso por el cual el exceso de agua por infiltración sobre la evaporación drena desde la zona radicular y continua circulando en dirección descendente a través de la zona no saturada, hasta la capa freática”<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> FAUSTINO, Jorge. *Ciclo hidrológico*. p.5.

La recarga hídrica puede ser natural, es concedida por el volumen de agua que penetra a un embalse subterráneo durante un periodo de tiempo a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua.

#### **1.1.5.2. Zonas de recarga hídrica**

El área o zona donde ocurre la recarga se llama zona de recarga hídrica y son sitios donde la capacidad de infiltración es alta. Los acuíferos se recargan principalmente a través de la precipitación y retenida por obstáculos naturales que encuentra durante su recorrido en suelos de alta capacidad de infiltración o rocas superficialmente permeables.

Es importante identificar las zonas que, por sus características, facilitan la infiltración; esto es, aquellas que ofrecen los mayores aportes de recarga hídrica y, dentro de estas, aquellas que por sus particularidades específicas sean susceptibles de disminuir su potencial de recarga al ser sometidas a un manejo diferente a su capacidad. A estas áreas se les denomina zonas críticas de recarga hídrica.

De acuerdo con el movimiento del agua en el suelo, subsuelo y manto rocoso, las zonas de recarga hídrica se pueden clasificar en:

- Zonas de recarga hídrica superficial: corresponden a prácticamente toda la cuenca hidrográfica, excepto las zonas totalmente impermeables. Después de cada lluvia, la zona de recarga hídrica superficial se humedece y origina escorrentía superficial, dependiendo de las condiciones de drenaje (relieve del suelo y saturación). La medición de ese caudal se realiza en el cauce principal del río y se conoce como descarga superficial.

- Zonas de recarga hídrica subsuperficial: son las zonas de la cuenca donde los suelos tienen capacidad para retener el agua o almacenarla superficialmente sobre una capa impermeable, que hace que el flujo horizontal en el subsuelo se concentre aguas abajo en el sistema de drenaje. Es la ocurrencia de caudales en la red hídrica, aun cuando las lluvias hayan finalizado, que dependen de la cantidad de precipitación y el efecto esponja del suelo (libera lentamente el agua).
- Zonas de recarga hídrica subterránea: son las zonas de la cuenca (sitios planos o cóncavos y rocas permeables) donde el flujo vertical de la infiltración es bastante considerable, esta es la que forma en la que se alimentan los acuíferos. Para la evaluación se pueden considerar dos métodos: directo a través de sondeos, bombeos y prospección geofísica, e indirecto mediante el balance hidrogeológico.
- Zonas de recarga hídrica de falla: corresponden a zonas de la cuenca que presentan fallas geológicas profundas o donde el balance hidrogeológico genera pérdidas por percolación profunda permitiendo el libre y rápido ascenso del agua.

## **1.2. Conceptos de pavimentos**

La función de un pavimento es la de proveer una superficie de rodamiento adecuada al tránsito y distribuir las cargas aplicadas por el mismo, sin que se sobrepasen las tensiones admisibles de las distintas capas del pavimento y de los suelos de fundación.

“Un buen diseño debe cumplir con las condiciones enunciadas precedentemente al menor costo inicial y con un mínimo de conservación durante la vida útil del pavimento”<sup>4</sup>

### **1.2.1. Estructura de un pavimento**

Los pavimentos están formados por capas de resistencia decreciente con la profundidad. Generalmente se componen de carpeta de rodamiento, que puede ser de asfáltica o de hormigón, base y subbase, apoyado todo este conjunto sobre la subrasante. En algunos casos pueden faltar algunas de estas capas.

La función de cada una de las capas del pavimento es doble: primero es distribuir las tensiones provenientes de la parte superior, reduciéndolas hasta valores admisibles para las capas inferiores y, segundo, ser suficientemente resistentes por sí mismas para soportar, sin deformaciones permanentes, las cargas a las cuales están sujetas.

#### **1.2.1.1. Subrasante**

La subrasante es la superficie o nivel terminada de una carretera a nivel de movimiento de tierras (corte o relleno), sobre la cual se colocará la estructura del pavimento o el afirmado si será una carretera de terracería.

Los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0,60 m deberán ser suelos adecuados y estables con  $CBR \geq 6 \%$ . En caso que el suelo, debajo del nivel superior de la subrasante,

---

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. *Apunte de pavimentos*. <http://materias.fi.uba.ar/6807/contenidos/Apuntes%20Pavimentos.pdf>.

tenga un CBR < 6 % (subrasante pobre o subinadecuada), corresponde a estabilizar los suelos. El ingeniero responsable analizará, según la naturaleza del suelo, alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo del suelo de cimentación, estabilización química de suelos, estabilización con geosintéticos, elevación de la rasante, cambiar el trazo vial, eligiéndose la más conveniente técnica y económica.

#### **1.2.1.2. Subbase**

La subbase es la capa la cual se coloca justo sobre la subrasante. Posee como función proteger a la base de humedad proveniente de la subrasante, y también evita que se mezcle el material de la base con impurezas. Todo lo anterior posee como objetivo principal el evitar la pérdida de resistencia de la base, y de ese modo garantizar el correcto funcionamiento de la estructura del concreto.

Su función es proporcionar a la base un cimiento uniforme y constituir una adecuada plataforma de trabajo para su colocación y compactación. Es deseable que cumpla también una función drenante, para lo cual es imprescindible que los materiales utilizados carezcan de finos y en todo caso suele ser una capa de transición necesaria. Se emplean normalmente subbases granulares constituidas por materiales cribados o de trituración parcial, suelos estabilizados con cemento, entre otros.

#### **1.2.1.3. Base**

Es la capa que recibe la mayor parte de los esfuerzos producidos por los vehículos. La carpeta de rodadura es colocada sobre de ella porque la capacidad de carga del material friccionante es baja en la superficie por falta de

confinamiento. Regularmente esta capa, además de la compactación, necesita otro tipo de mejoramiento (estabilización) para resistir las cargas del tránsito sin deformarse y transmitir las en forma adecuada a las capas inferiores. El valor cementante en una base es indispensable para proporcionar una sustentación adecuada a las carpetas asfálticas delgadas. En caso contrario, cuando las bases se construyen con materiales inertes y se comienza a transitar por la carretera, los vehículos provocan deformaciones transversales.

La base es la capa la cual se encuentra entre la capa de concreto y la subbase. Los materiales, los cuales componen la base, deben ser de mejor calidad que los utilizados en la subbase, pues esta soporta todas las cargas transmitidas por la capa de concreto. La capa base debe poseer una compactación óptima, pues no debe presentar deformaciones en esta, y de ser así, la capa de concreto sufrirá daños severos, los cuales repercuten en el costo de la obra debido a las reparaciones.

#### **1.2.1.4. Carpeta de rodadura**

Es la capa superior del pavimento formado por mezclas bituminosas (cemento tipo portland o emulsión asfáltica). A su vez, el pavimento es la capa superior colocada sobre la base, soporta directamente la carga de diseño. La carpeta de rodadura debe ser cual que proporcione seguridad, comodidad y libre circulación para los usuarios, cumpliendo así los anchos y espesores de acuerdo a las normas vigentes.

Entre las funciones principales de la carpeta de rodadura están impermeabilizar el pavimento, para que las capas subyacentes puedan mantener su capacidad de soporte, proveer una superficie resistente al deslizamiento, incluso en una pista húmeda y reducir las tensiones verticales que la carga por

eje ejerce sobre la capa base, para controlar la acumulación de deformaciones plásticas en dicha capa.

### **1.2.2. Propiedades mecánicas y físicas de las estructura portante**

Es indispensable elegir un excelente material granular que cumpla con todas las disposiciones, tanto físicas como mecánicas, para la base y subbase en la construcción de pavimento de cualquier tipo, ya sea hidráulico, asfáltico, tradicionales o permeables, pues la base y subbase son los soportes principales del pavimento. Esto también debe considerarse en la práctica y la colocación correcta del material granular, al utilizar la maquinaria adecuada y realizar los ensayos de calidad correspondientes.

#### **1.2.2.1. Granulometría para base y subbase**

Una propiedad clave de los agregados que se usan en las bases y superficies de las carreteras es la distribución de los tamaños de partículas al mezclarlos. La graduación de los agregados, es decir, la combinación de tamaños de partículas en la mezcla, afecta la densidad, la resistencia y la economía de la estructura del pavimento.

Se usa un análisis granulométrico para determinar las propiedades relativas de los diferentes tamaños de partículas en una mezcla de agregados minerales. Para llevarlo cabo, se pasa una muestra pesada de agregado seco a través de un juego de mallas o tamices cuyo tamaño de abertura ha sido seleccionado previamente. Los tamices se agrupan colocando hasta arriba los que tienen la abertura mayor y debajo aquellos con aberturas sucesivamente más pequeñas. La muestra de agregado se agita con un vibrador mecánico de mallas y se

determina el peso del material retenido en cada tamiz, el cual se expresa como un porcentaje de la muestra original. En el método T-27 de la AASHTO se dan los procedimientos detallados para ejecutar un análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

Las mallas de prueba que se usan comúnmente para los proyectos de carreteras son aquellas con aberturas de 2 ½, 2, 1 ½, 1, ¾, ½, ⅜ de plg<sup>2</sup> para las fracciones grandes y con 4, 10, 40, 80, 100, y 200 mallas por pulgada para las fracciones más pequeñas. Estas últimas mallas se designan como No. 4, No. 10, entre otros. A la porción de material agregado que queda retenida en la malla No. 10 (esto es, con partículas mayores de 2,00 mm) se le conoce como agregado grueso. Al material que pasa por la malla No. 10 pero queda retenido en la malla No. 200 (partículas mayores que 0,075 mm) se le conoce como agregado fino. El material que pasa por la malla No. 200 se llama fino.

Tabla II. **Tipos de graduación para material de subbase o base granular**

Estándar mm	Tamiz No.4	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)					
		TIPO "A" (Sub-base) 50 mm (2") máximo	TIPO "A" (Base) 50 mm (2") máximo		TIPO "B" (Sub-base y Base) 38.1 mm (1 1/2") máximo		TIPO "C" (Sub-base y Base) 25 mm (1") máximo
		<b>A-1</b>	<b>A-1</b>	<b>A-2</b>	<b>B-1</b>	<b>B-2</b>	<b>C-1</b>
50	2"	100	100	100			
38.1	1 1/2"	-	-	-	100	100	
25	1"	60-90	65-90	60-85	-	-	100
19	3/4"	-	-	-	60-90	-	-
9.5	3/8"	-	-	-	-	-	50-85
4.75	No. 4	20-60	25-90	20-50	30-60	20-50	35-65
2	No.10	-	-	-	-	-	25-50
0.425	No. 40	-	-	-	-	-	12-30
0.075	No. 200	3-12	3-12	3-10	5-15	3-10	5-15

Fuente: Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.* p 304-2.

Según el manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda de Guatemala, el material para la capa subbase o base granular debe llenar con los requisitos de graduación, determinada por los métodos AASHTO T 27 Y AASHTO T 11, mostrados en la tabla II.

El porcentaje que pasa por el tamiz 0,075mm (No. 200) debe ser menor que la mitad del porcentaje que pasa el tamiz 0,425mm (No. 40).

#### **1.2.2.2. Propiedades físicas y mecánicas de los materiales pétreos**

El término partículas minerales granulares que se usan ampliamente para bases, subbases y relleno de carreteras. Los materiales pétreos también se usan en combinación con un material cementante para formar concretos para bases, subbases, superficies de desgaste y estructuras de drenaje.

Las principales propiedades físicas y mecánicas por considerar son la granulometría, contenido de humedad, límites de Atterberg, peso volumétrico y grado de compactación. En la tabla III muestra los ensayos aplicados según el manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda de Guatemala.

#### **1.2.2.3. CBR**

CBR o relación de soporte California, por las siglas en inglés de *California bearing ratio*, fue desarrollado en 1925. Este ensayo mide la resistencia al corte

(esfuerzo cortante) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, la ASTM (American Standards for Testing and Materials) denomina a este ensayo, simplemente como “Relación de soporte” y está normado con el número *ASTM D 1883-73*.

Tabla III. **Ensayos a material granular para capas subbase y base**

<b>Ensayo</b>	<b>Norma</b>
CBR	ASHTO T193
Abrasión	ASHTO T 96
Graduación	ASHTO T 11 y T 27
Muestra preparada en húmedo	ASHTO T 146
límite líquido	ASHTO T 89
Índice de plasticidad	ASHTO T 90
Equivalente de arena	ASHTO T 176
Humedad de campo usando Carburo	ASHTO T 217
Compactación	ASHTO T 180 y T 256

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Este ensayo se utiliza para evaluar la calidad relativa de suelos de la subrasante, algunos materiales de subbase y bases granulares, que contengan solamente una pequeña cantidad de material que pasa por el tamiz de 50 mm, y que es retenido en el tamiz de 20 mm. Se recomienda que la fracción no exceda del 20 %.

El valor se obtiene como la relación de la carga unitaria en Kg/cm<sup>2</sup> o Psi (libra por pulgada cuadrada) necesaria para lograr una cierta profundidad de

penetración del pistón dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas, con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. En ecuación, esto se expresa:

$$CBR = \frac{\text{Carga unitario de ensayo}}{\text{Carga unitario patrón}} * 100$$

Los valores de carga unitaria que deben utilizarse en la ecuación serán utilizados de acuerdo a la tabla IV.

Tabla IV. **Valores de carga unitaria para CBR**

Penetración		Carga unitaria patrón		
mm	Pulgadas	Mpa	Kg/cm <sup>2</sup>	Psi
2,54	0,1	6,9	70	1 000
5,08	0,2	10,3	105	1 500
7,62	0,3	13,1	133	1 900
10,16	0,4	15,8	162	2 300
12,7	0,5	17,9	183	2 600

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

El ensayo se utiliza para establecer una relación entre el comportamiento de los suelos usualmente utilizados como bases y subrasantes bajo la carpeta de rodadura de carreteras. En la tabla V muestra la clasificación de acuerdo a los valores obtenidos después de realizar el ensayo de CBR.

Cuando se analizan los suelos, ya sea porque servirán como soporte para nuestra estructura o para bancos de material, hay una serie de parámetros a

evaluar previo a la utilización del mismo. Algunas de estas características son evaluadas en el perfil del suelo de interés y este puede ser tomado hasta 1,50 m de profundidad. Está conformado por estratos intercalados de suelos finos, arcillas, limos, arenas, entre otros. Todo dependerá de las características propias de la región.

Tabla V. **Clasificación de suelos para infraestructura de pavimentos**

			<b>Sistema de clasificación</b>	
<b>CBR</b>	<b>Clasificación general</b>	<b>Usos</b>	<b>Unificado</b>	<b>AASHTO</b>
0 - 3	Muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A5,A6,A7
3 - 7	Pobre a regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7 -20	Regular	Subbase	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20 - 50	Bueno	Base, Subbase	GM, GC,W, SM, SP, GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
> 50	Excelente	Base	GW, GM	A1-a, A2-4, A3

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Los suelos utilizados para las capas subbase y base estarán sujetos a mejoras mecánicas que lleguen a requerir para cumplir con las especificaciones requeridas de diseño. Los más usuales son la estabilización con cal o cemento, el cribado, la trituración y en algunas ocasiones el lavado (para arenas en cauces de arroyos). Es de gran importancia conocer el tipo de terreno con el que se va a trabajar, ya que en base a esto se elige el tipo de maquinaria y el personal

suficiente para trabajar en forma adecuada y la manera en la que el material suelo será utilizado.

#### **1.2.2.4. Características del suelo**

Todo material que será utilizado debe ser enviado a laboratorio para efectuar el análisis correspondiente. Para la construcción de pavimentos se realizan básicamente 3 tipos de ensayos, que serán para clasificar el suelo, controlar la obra y proyectar el espesor y los porcentajes óptimos de aglutinante de las diferentes capas.

#### **1.2.3. Diseño de pavimento asfáltico**

El proceso de diseñar pavimentos no es más que la determinación de los espesores de cada capa que constituye la sección del mismo, la cual permitirá soportar las cargas de diseño durante un periodo de tiempo determinado. Dependiendo del tipo de pavimento (flexible o rígido) existen diferentes métodos para su diseño, pero todos tienen en común que toman en cuenta principalmente los siguientes factores: tránsito o condiciones de carga, características del suelo de cimentación, características de los materiales que constituyen las capas del pavimento, agentes ambientales y periodo de diseño.

Cuando se elabora el diseño del pavimento también se pueden comparar diferentes alternativas de materiales y de espesores de capa, hasta obtener el óptimo. Cada método de diseño tiene algún parámetro que permite identificar la calidad o la resistencia del pavimento.

En la actualidad el mercado ofrece una variedad de pavimentos y cada uno de ellos responde a una metodología de diseño propia. Se podría decir que uno

de los principales parámetros de diseño responde de acuerdo con los materiales que constituyen el perfil del mismo. De forma general, se pueden diseñar pavimentos flexibles y rígidos, pero también existentes otros tipos de pavimento como son los pavimentos semirígidos, pavimentos reforzados con geosintéticos, pavimentos modificados, entre otros.

En la actualidad el método más utilizado para el diseño de pavimentos es el propuesto por American of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en el cual es aplicable tanto para flexible como para pavimento rígido. La diferencia radica que para el primero se determina un número estructural SN calculado a partir de datos de tránsito, periodo de diseño, condiciones de drenaje y factores estadísticos. Para el diseño del pavimento rígido todos los factores descritos en el anterior sirven para calcular un espesor de losa D.

#### **1.2.3.1. Propiedades y características de la mezcla asfáltica**

Una superficie de rodadura debe proporcionar una superficie segura, estable y estética. Como es imposible que una mezcla asfáltica cumpla a cabalidad con todas las exigencias, lo que se busca es una superficie en la que se equilibre las propiedades para optimizar el diseño de la misma. Los materiales asfálticos proporcionan superficies continuas y cómodas para la rodadura de los vehículos. No obstante, hay que establecer un balance entre la durabilidad, rugosidad, impermeabilidad y otras características útiles o imprescindibles para el usuario. Por ejemplo, para áreas frías, se han desarrollado mezclas muy impermeables y ricas en mortero.

En la actualidad es común la modificación de las mezclas asfálticas para carreteras. Se busca la optimización de la respuesta mecánica y de la durabilidad

de la mezcla. Por la misma razón, la calidad de los agregados es absolutamente imprescindible, aunque todo ello suponga un costo mayor para el pavimento.

- Textura superficial
- Conductividad hidráulica
- Absorción de ruido
- Propiedades mecánicas (en relación con el tráfico)
  - Resistencia a la fatiga
  - Resistencia a las deformaciones plásticas permanentes
  - Módulo de rigidez
  - Resistencia a la pérdida de partículas
- Durabilidad (en relación con el clima)
  - Resistencia al lavado por el agua
  - Resistencia a la fisuración térmica
  - Resistencia a la fisuración por reflexión
  - Resistencia al envejecimiento
- Trabajabilidad
  - Compactabilidad
  - Resistencia a la segregación del agregado grueso
  - Resistencia a la segregación del agregado/ligante

#### **1.2.3.2. Diseño por método AASHTO 93**

El método de la AASHTO, versión 1993, describe los principales parámetros y procedimientos para el diseño de la sección estructural de los pavimentos flexibles y rígidos de carreteras aplicables para Guatemala. Para los pavimentos flexibles, el método establece que la superficie de rodamiento se resuelve solamente con concreto asfáltico y tratamientos superficiales, pues asume que tales estructuras soportarán niveles significativos de tránsito (mayores de 50 000

ejes equivalentes acumulados de 8,28 ton durante el período de diseño). Deja fuera pavimentos ligeros para tránsitos menores al citado, como los caminos revestidos o de terracería.

El procedimiento para el diseño de pavimento en versión 1993 está derivado de las ecuaciones originales de la AASHO de 1961, producto de las pruebas en Ottawa, Illinois, con tramos a escala natural y para todo tipo de pavimentos. Las versiones de 1986 y la actual de 1993 se han modificado para incluir factores o parámetros de diseño que no habían sido considerados y que son producto de la experiencia adquirida por ese organismo entre el método original y su versión más moderna.

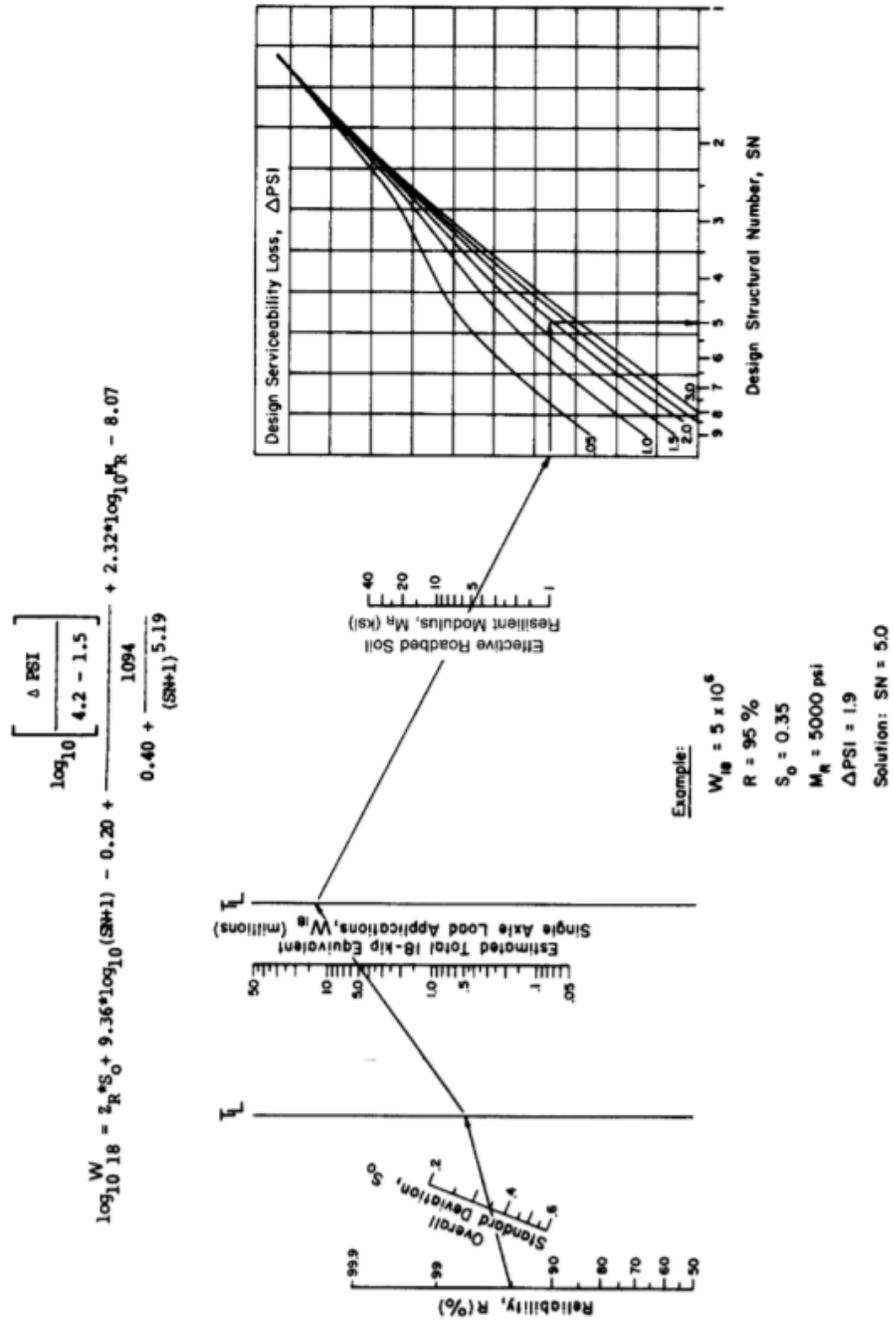
El diseño está basado primordialmente en identificar o encontrar un “número estructural SN” para el pavimento flexible que pueda soportar el nivel de carga solicitado. Para determinar el número estructural SN requerido, el método proporciona la ecuación general y la gráfica de la figura 10:

$$\text{Log}W_{18} = Z_R \cdot S_o + 9,36 \cdot \text{Log}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log} \frac{(\Delta PSI)}{4,2 - 1,5}}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \text{Log}M_R - 8,07$$

Donde:

- $W_{18}$  = Tráfico equivalente o ESAL's.
- $Z_R$  = Factor de desviación normal para un nivel de confiabilidad R
- $S_o$  = Desviación estándar
- $\Delta PSI$  = Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final deseado
- $M_R$  = Módulo de resiliencia efectivo de la subrasante
- $SN$  = Número estructural.

Figura 10. Gráfica de diseño para estructuras de pavimento flexible



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias*. p. 74.

En la versión de 1993 contempla los ejes equivalentes sencillos de 18 000 lb (8,2 ton) acumulados durante el período de diseño, por lo que no ha habido grandes cambios. La ecuación siguiente puede ser usada para calcular el parámetro del tránsito  $W_{18}$  en el carril de diseño.

$$W_{18} = D_D * D_L * W_{18}^3$$

Donde:

- $W_{18}$  = Tránsito acumulado en el primer año, en ejes equivalentes sencillos de 8,2 ton, en el carril de diseño
- $D_D$  = Factor de distribución direccional; se recomienda 50 % para la mayoría de las carreteras, puede variar de 0,3 a 0,7, dependiendo de en qué dirección va el tránsito con mayor porcentaje de vehículos pesados.
- $W_{18}^3$  = Ejes equivalentes acumulados en ambas direcciones.
- $D_L$  = Factor de distribución por carril, cuando se tengan dos o más carriles por sentido. Se recomiendan los valores de la tabla VI

Una vez calculados los ejes equivalentes acumulados en el primer año, el diseñador deberá estimar con base en la tasa de crecimiento anual y el período de diseño en años, el total de ejes equivalentes acumulados y así contar con un parámetro de entrada para la ecuación general o para el nomograma de la figura 10.

Es importante hacer notar que la metodología original de AASHTO usualmente consideraba períodos de diseño de 20 años; en la versión actual de 1993, recomienda los siguientes períodos de diseño en función del tipo de carretera y del uso de la misma. En la tabla VII podemos encontrar el sugerido de los periodos de diseño para el método de 1993.

Tabla VI. Factores de distribución por carril

No. Carriles en cada sentido	Porcentaje de W18 en el carril de diseño
1	100
2	80 - 100
3	60 - 80
4 o más	50- 75

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias.* p.63.

Tabla VII. Periodos de diseño en función del tipo de carretera

Tipo de carretera	Periodo de diseño
Urbana con altos volúmenes de tránsito.	30 - 50 años
Interurbana con altos volúmenes de tránsito.	20 - 50 años
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito.	15 - 25 años
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito.	10 - 20 años

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias.* p.64.

Confiabilidad “R”: con este parámetro se trata de llegar a cierto grado de certeza en diseño, para asegurar que las diversas alternativas de la sección estructural que se obtengan, y cumplir así el periodo de diseño. Se consideran posibles variaciones en las predicciones del tránsito en ejes acumulados y en el comportamiento de la sección diseñada.

En el método AASHTO-93 para el diseño de la sección estructural de pavimentos flexibles, recomienda valores desde 50 y hasta 99,9 para el parámetro “R” de confiabilidad, con diferentes clasificaciones funcionales. Los niveles más altos corresponden a obras que estarán sujetas a un uso intensivo como autopistas, mientras que los niveles más bajos corresponden a obras o caminos comunales o locales

Tabla VIII. **Valores de “R” de confiabilidad**

<b>Niveles de confiabilidad</b>	
<b>Clasificación</b>	<b>Nivel recomendado por AASHTO para carreteras</b>
Carreteras nacionales o autopista.	80 - 99.9
Carreteras departamentales.	75 - 95
Carreteras municipales.	75 - 95
Carreteras comunales.	50 - 80

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias.* p.65.

El parámetro desviación estándar global “So” está ligado directamente con la confiabilidad (R). Una vez determinado, en este paso deberá seleccionarse un valor So “desviación estándar global”, representativo de condiciones locales particulares, que considera posibles variaciones en el comportamiento del pavimento y en la predicción del tránsito.

Valores de “So” en los tramos de prueba de AASHO no incluyeron errores en la estimación del tránsito; sin embargo, el error en la predicción del comportamiento de las secciones en tales tramos, fue de 0,25 para pavimentos rígidos y 0,35 para los flexibles, lo que corresponde a valores de la desviación estándar total debidos al tránsito de 0,35 y 0,45 para pavimentos rígidos y flexibles respectivamente.

Módulo de resiliencia efectivo: en este método, la parte fundamental para caracterizar debidamente a los materiales consiste en la obtención del Módulo de Resiliencia, con base en pruebas de laboratorio, realizadas en materiales a utilizar en la capa subrasante (método AASHTO T-274), con muestras representativas que simulen las estaciones del año respectivas. El módulo de resiliencia “estacional” será obtenido alternadamente por correlaciones con propiedades del suelo, tales como el contenido de arcilla, humedad, índice plástico, entre otros.

Finalmente, deberá obtenerse un “módulo de resiliencia efectivo”, que no es más que el resultante de la combinación de todos los módulos estacionales combinados.

Para obtener cada módulo estacional a lo largo de un año en diferentes estaciones hay dos tipos de procedimientos: uno, obteniendo la relación en el laboratorio entre el módulo de resiliencia y el contenido de humedad de diferentes

muestras en diferentes estaciones del año y, dos, utilizando algún equipo para medición de deflexiones sobre carreteras en servicio durante diferentes estaciones del año.

Para el diseño de pavimentos flexibles, únicamente se recomienda convertir los datos estacionales en módulo de resiliencia efectivo de la capa subrasante, utilizando la figura 11 proporciona un valor sopesado en función del “daño equivalente anual” obtenido para cada estación del año También puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$Uf = 1,18 \times 10^{18} * M_R^{-2,32}$$

Donde:

$Uf$ = Daño relativo en cada estación (por mes o quincenal).

$M_R$ = Módulo de Resiliencia de la capa subrasante, obtenido en laboratorio o con deflexiones cada quincena o mes.

Por lo tanto:

$$\bar{U}f = \text{Promedio de daño relativo} = \frac{\sum Uf}{n}$$

El  $M_R$  efectivo, será el que corresponda al  $\bar{U}f$  promedio

Pérdida o diferencia entre índices de servicio inicial y terminal.

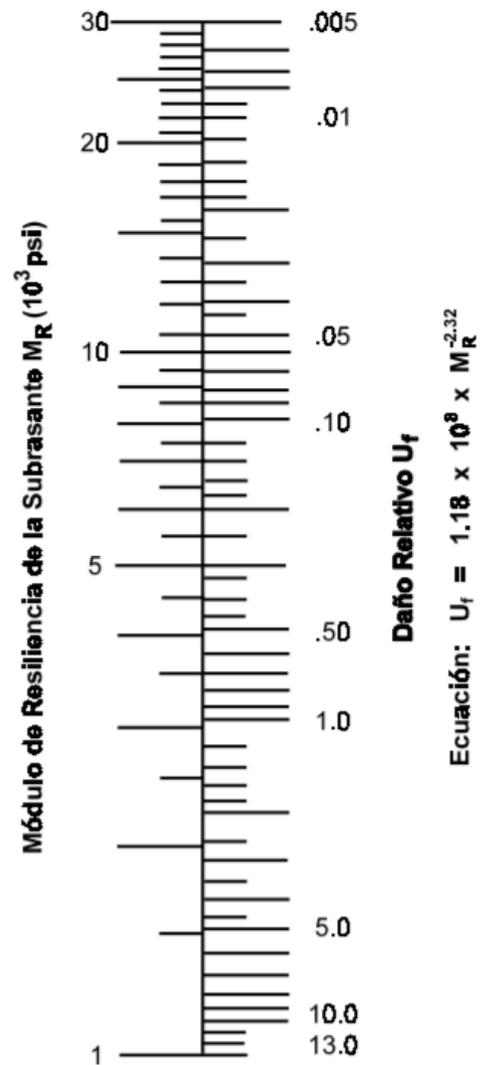
Para determinar el cambio o perdida en el servicio que una carretera puede proporcionar la podemos definir mediante la siguiente ecuación:

$PSI = \text{índice de servicio presente}$

$$\Delta PSI = P_0 - P_t$$

Figura 11. Cálculo del módulo de resiliencia efectivo de la subrasante en pavimentos flexibles

Mes	Módulo de Resiliencia de la Subrasante $M_R$ (psi)	Daño Relativo $U_f$
Ene.		
Feb.		
Mar.		
Abr.		
May.		
Jun.		
Jul.		
Ago.		
Sep.		
Oct.		
Nov.		
Dic.		
Sumatoria:	$\sum U_f =$	



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias.* p.80.

Donde:

- $\Delta PSI$ = Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final.
- $P_o$ = Índice de servicio inicial (4,5 para pavimentos rígidos y 4,2 para flexibles).
- $P_t$ = Índice de servicio terminal, para el cual AASHTO-93. 2,5 ó 3,0 para caminos principales y 2,0 para secundarios

En la versión AASHTO-93 no ha modificado la escala del índice de servicio original de 0 a 5; es 0 para caminos intransitables y 5 para carreteras perfectas.

En climas muy extremos, como el frío, la ecuación de AASHTO-93 recomienda evaluar adicionalmente la pérdida del índice de servicio original y terminal debida por congelamiento y deshielo, que como resultado producen cambios volumétricos notables en la capa subrasante y capas superiores de la estructura del pavimento.

Acerca de la determinación de espesores por capas, cuando se ha obtenido el número estructural  $SN$  para la sección del pavimento con la ecuación general básica de diseño, donde se involucraron los parámetros anteriores, se procede a determinar una sección, es decir, el conjunto de capas que provea de suficiente capacidad de soporte equivalente al número estructural de diseño original. La siguiente ecuación es utilizada para obtener los diversos espesores de cada capa, que en conjunto conformen una superficie de rodamiento (carpeta de rodadura).

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3$$

Donde:

$a_1, a_2, a_3 =$  Coeficientes de capa para base y subbase.  
 $D_1, D_2, D_3 =$  Espesor de la carpeta, base y subbase.  
 $m_2, m_3 =$  Coeficientes de drenaje para base y subbase.

Para obtener los coeficientes  $a_1, a_2, a_3$  de capa deberán utilizarse las figuras 12-15, en donde se representan valores de correlaciones hasta de cinco diferentes pruebas de laboratorio, como módulo elástico, triaxial, entre otros.

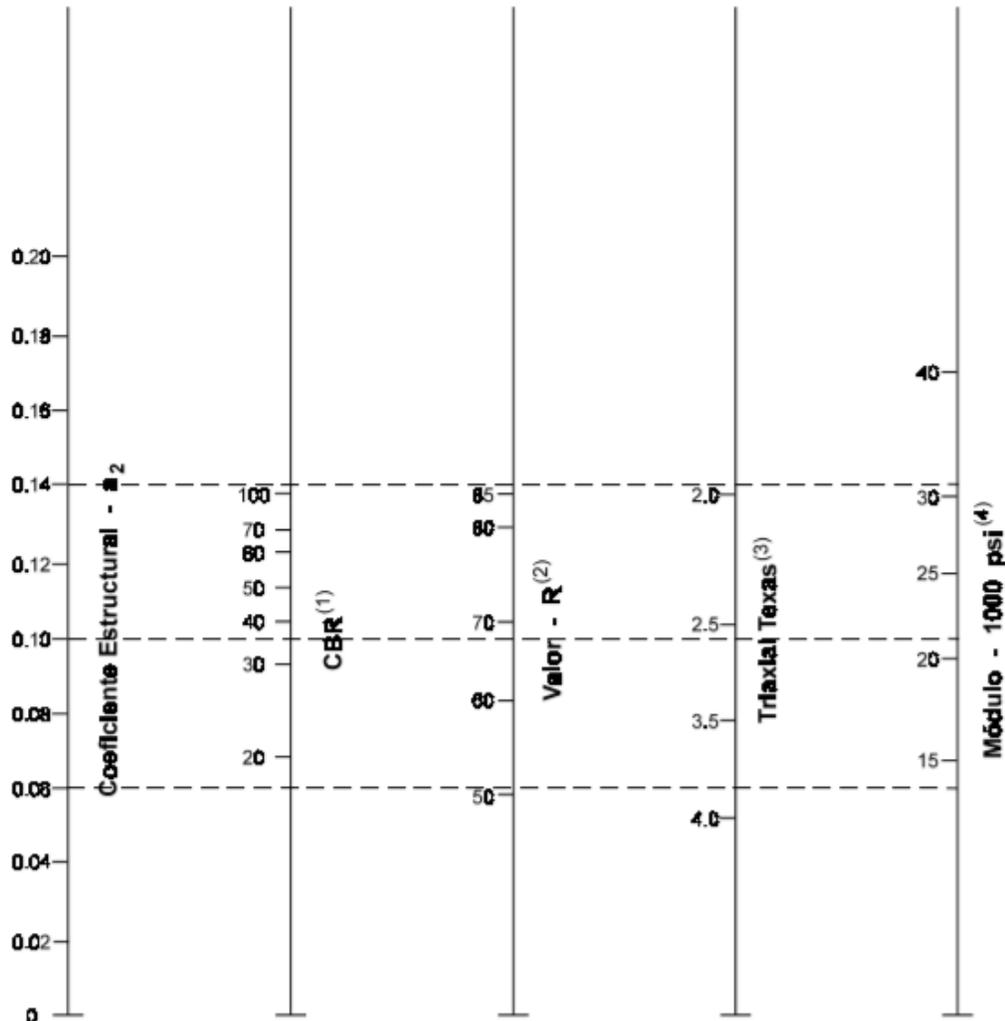
Para obtener los coeficientes de drenaje,  $m_2$  y  $m_3$  de las capas de base y subbase, el método AASHTO-93 se basa en la capacidad del drenaje para remover la humedad interna del pavimento, misma que está definida en la tabla IX donde nos muestra los tiempos de drenaje.

Tabla IX. **Capacidad del drenaje para remover la humedad**

Calidad del drenaje	Tiempo de drenaje
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Malo	agua no drenada

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias.* p.70.

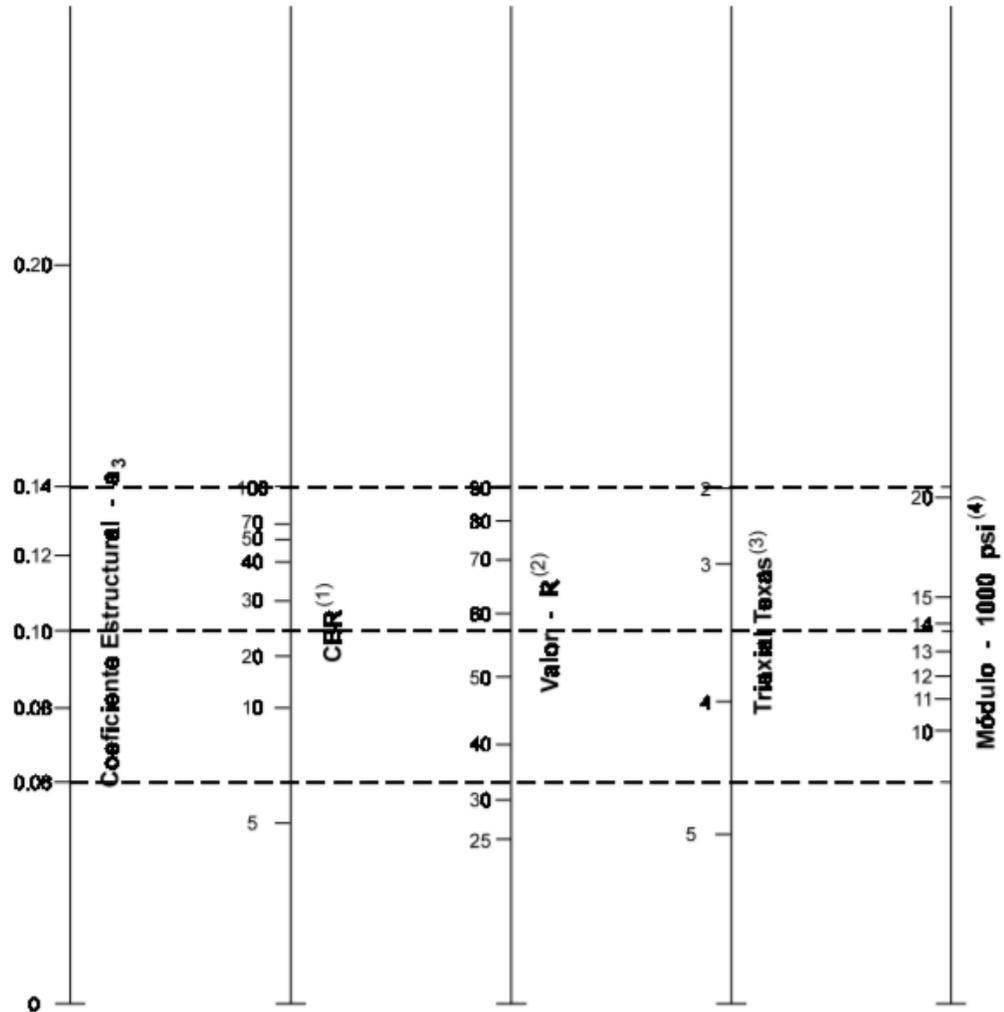
Figura 12. Variación de los coeficientes de capa “a<sub>2</sub>”, en bases granulares



- (1) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Illinois.
- (2) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias.* p.76.

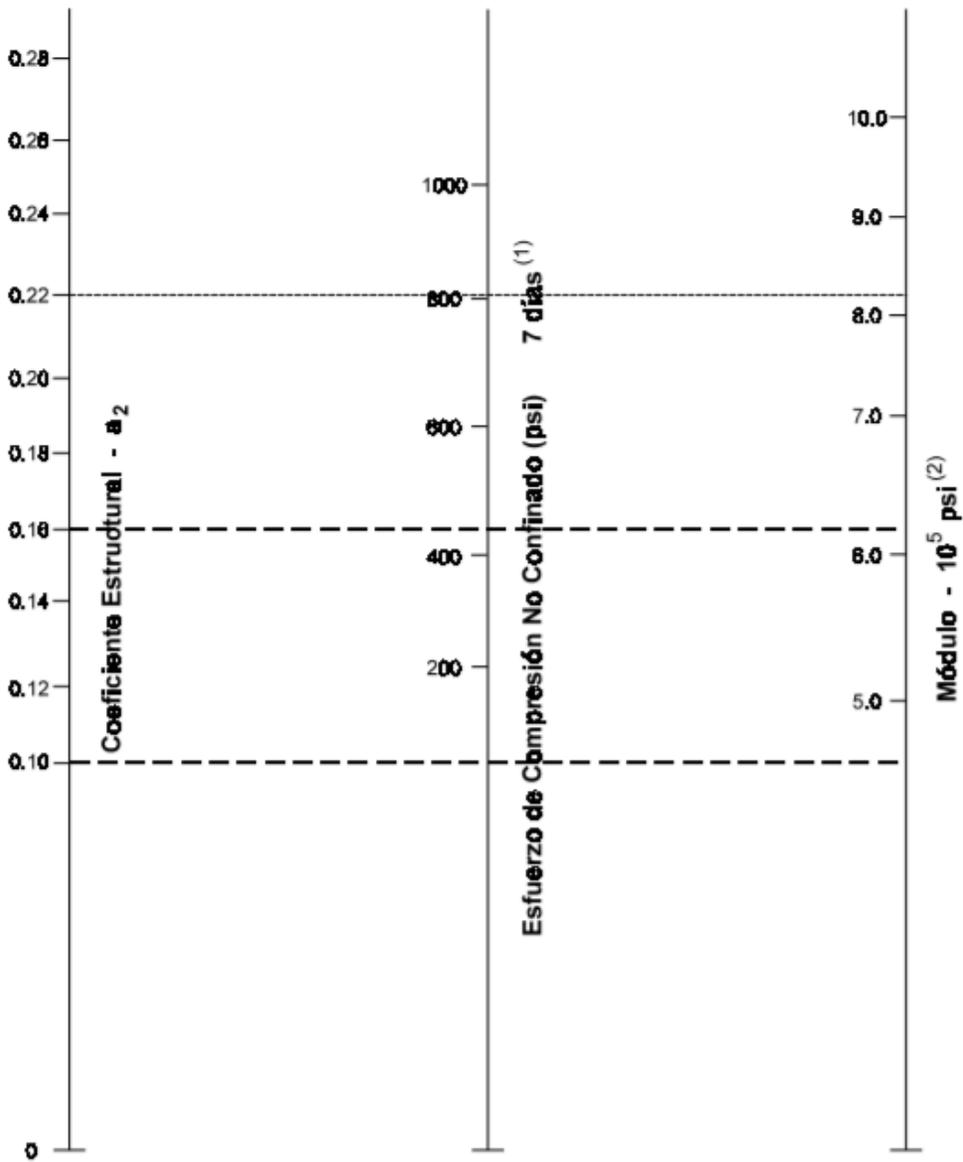
Figura 13. Variación de los coeficientes de capa “a<sub>3</sub>” en subbases granulares



- (1) Escala derivada de correlaciones de Illinois.
- (2) Escala derivada de correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, Nuevo México y Wyoming.
- (3) Escala derivada de correlaciones obtenidas de Texas.
- (4) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias.* p.77.

Figura 14. Variación de los coeficientes capa “a<sub>2</sub>” en bases estabilizadas con cemento Portland

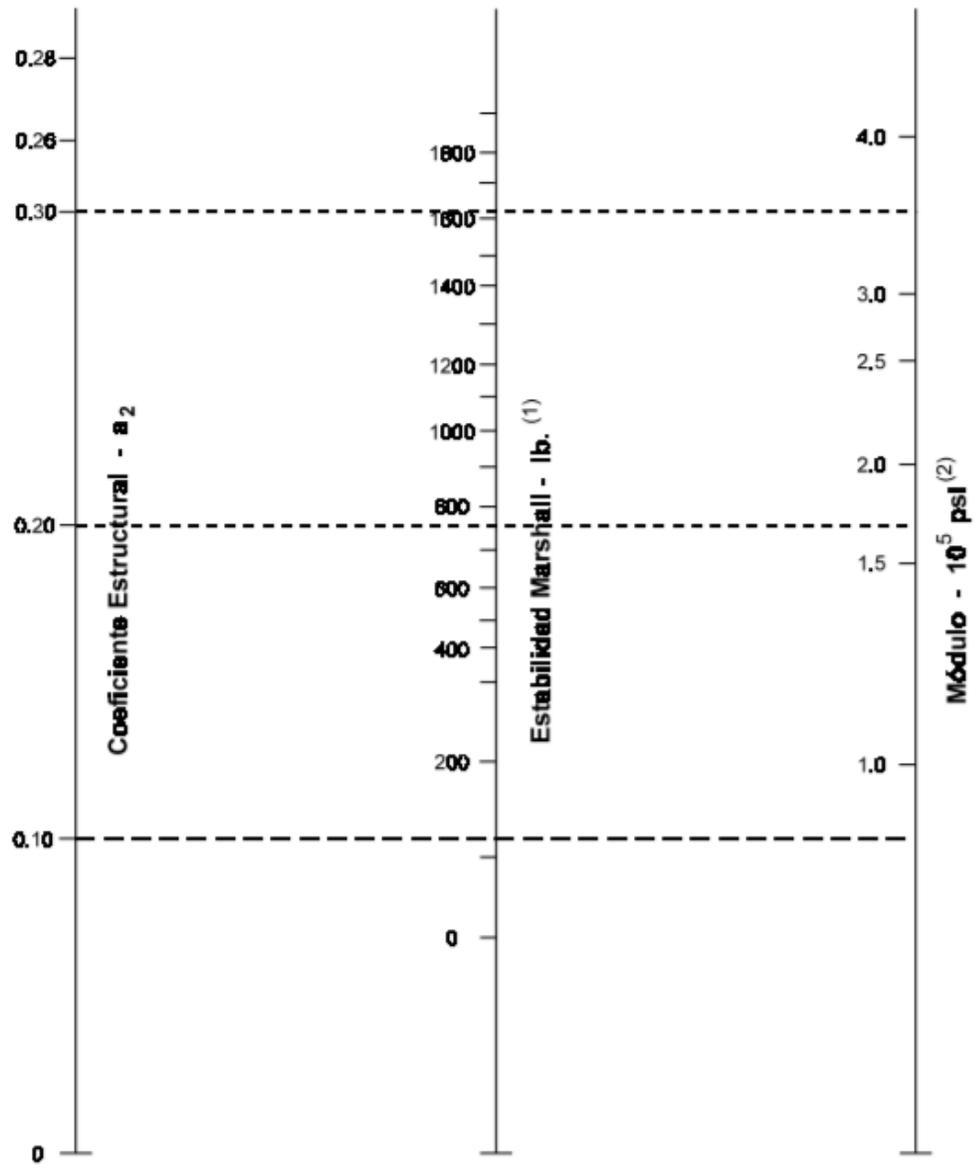


(1) Escala derivada por correlaciones promedio obtenidas de Illinois, Louisiana y Texas.

(2) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias*. p.78.

Figura 15. Variación de los coeficientes de capa “a<sub>2</sub>” en bases estabilizadas con asfalto



(1) Escala derivada por correlación obtenida de Illinois.

(2) Escala derivada del proyecto (3) del NCHRP.

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias.* p.79.

Los valores recomendados para  $m_2$  y  $m_3$  (bases y subbases granulares sin estabilizar) en función de la calidad del drenaje y el porcentaje del tiempo a lo largo de un año, los podemos tomar de la tabla X.

Tabla X. **Valores  $m_1$  recomendados para modificar los coeficientes estructurales de capa de bases y subbases sin tratamientos para pavimentos flexibles**

Calidad del drenaje	Porcentaje de tiempo al cual está expuesta la estructura del pavimento a niveles de humedad próxima a la saturación			
	Menor del 1 %	1 – 5 %	5 – 25 %	Mayor del 25 %
<b>Excelente</b>	1,40 – 1,35	1,35 – 1,30	1,30 – 1,20	1,20
<b>Bueno</b>	1,35 – 1,25	1,25 - 1,5	1,15 – 1,00	1,00
<b>Regular</b>	1,25 – 1,15	1,15 – 1,05	1,00 – 0,80	0,80
<b>Pobre</b>	1,15 – 1,05	1,05 – 0,80	0,80 – 0,60	0,60
<b>Muy pobre</b>	1,05 – 0,95	0,95 – 0,75	0,75 – 0,40	0,40

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias*. p.70.

Para suelos que han sido modificados químicamente con cal o cemento y para la superficie de rodadura con concreto asfáltico, el método no considera un posible efecto por el drenaje, por lo que en la ecuación de diseño solo intervienen valores de  $m_2$  y  $m_3$  y no se asigna valor para  $m_1$ , correspondiente a la carpeta de rodadura.

Para el cálculo de los espesores  $D_1, D_2$  y  $D_3$  (en pulgadas), el método sugiere utilizar los valores presentados en la tabla XI para los valores mínimos, en función del tránsito en ejes equivalentes sencillos acumulados:

Tabla XI. **Espesores mínimos en función de los ejes equivalentes (pulgadas)**

<b>Tránsito (ESAL) en ejes equivalentes</b>	<b>Carpeta de concreto asfáltico</b>	<b>Bases granulares</b>
Menor de 50 000	1,0 o T.S.	4,0
50 001 – 150 000	2,0	4,0
150 001 – 500 000	2,5	4,0
500 001 – 2 000 000	3,0	6,0
2 000 001 – 7 000 000	0,5	6,0
Mayor que 7 000 000	4,0	6,0

T.S.= Tratamiento superficial con sellos

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias*. p.71.

Análisis del diseño final con sistema multicapa: un pavimento flexible (hecho de concreto asfáltico) es una estructura conformada de varias capas, por lo cual se deberá diseñar en función de ello. Como se dijo, el “número estructural SN” sobre la capa subrasante o cuerpo del terraplén es lo primero por calcularse. De igual manera deberá calcularse el número estructural requerido sobre las capas de la subbase y base, con los valores de resistencia para cada uno. Se

encontrará las diferencias entre los números estructurales que se requieren sobre cada capa. El espesor máximo permitido de cualquier capa puede ser calculado a partir de fórmulas. Por ejemplo, el número estructural máximo permitido para material de la capa de subbase, debe ser igual al número estructural requerido sobre la subbase restado del SN requerido sobre la subrasante.

El método AASHTO-93 recomienda para el diseño de los espesores de las capas de base y subbase el empleo de la siguiente figura 16 y las siguientes ecuaciones:

$$D_1^* \geq \frac{SN_1}{a_1}$$

$$SN_1^* = a_1 D_1 \geq SN_1$$

$$D_2^* \geq \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_1 m_2}$$

$$SN_1^* + SN_2^* \geq SN_2$$

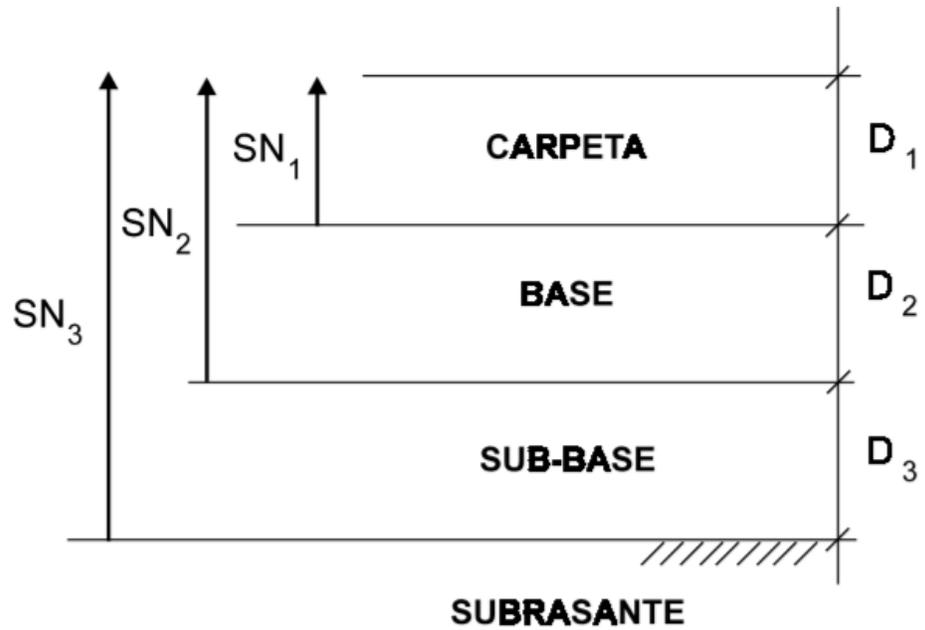
$$D_3^* \geq \frac{SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*)}{a_3 m_3}$$

$a$ ,  $m$  y  $SN$  Corresponden a valores mínimos requeridos.

$D^*$  y  $SN^*$  Representan los valores finales de diseño.

Con el anterior procedimiento queda configurada la sección estructural de proyecto para pavimento flexible.

Figura 16. Recomendación de AASTHO



Fuente: Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles problemática, metodologías de diseño y tendencias.* p.72.



## **2. DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO LOS ACHIOTES**

### **2.1. Descripción geomorfológica de la microcuenca del río Los Achiotes**

La investigación de presente documento tiene por objetivo determinar una nueva tecnología para minimizar el impacto ambiental en la región, como el resultado de la actividad minera dentro de los municipios de San Pedro Ayampuc y San José del Golfo, ambos del departamento de Guatemala. Es una actividad desarrollada por el proyecto Progreso VII Derivada, cuyo fin es el procesamiento de oro y plata en el área antes mencionada.

#### **2.1.1. Ubicación geográfica**

La microcuenca del río Los Achiotes forma parte del sistema hidrográfico de la cuenca del río Motagua. Esta última pertenece a la vertiente del Atlántico. Con un área de 12 719 km<sup>2</sup> y una longitud de 486,55 km, es una de las cuencas más grandes de Guatemala.

La microcuenca del río Los Achiotes tiene una extensión de 43,29 km<sup>2</sup>, perímetro 22,73 km, dentro de la misma se ubica el proyecto Progreso VII Derivada, como se observa en la figura 17.

La microcuenca tiene sus cabeceras de cuenca (parteaguas) en la aldea El Carrizal, caserío El Tizate y finca El Tablón (río Los Achiotes); finca El Espinal, El Platanar, caserío Joya del Platanar, Cerro Cerco de Piedra y Cerro



Las Mesitas (quebrada Poza del Coyote) y cerro El Pinar, cerro Agua Zarca, finca El Espinal, El Platanar y la aldea La Choleña y el poblado de San José del Golfo (quebrada Agua Zarca). “Este sistema de drenajes corre de sur a norte, se une en el lugar llamado Los Achiotos (San Antonio) o Encuentros de la Barranca, descarga sus agua a la cuenca del río Motagua”<sup>5</sup>

### **2.1.2. Morfología y topografía**

El proyecto Progreso VII Derivada hidrológicamente está ubicado dentro de la microcuenca del río Los Achiotos, cuyo cauce principal es llamado con el mismo nombre. La microcuenca del río Los Achiotos se ubica en la subregión de las montañas de San Raymundo-Progreso-Jalapa-Espíritu Santo, que pertenece a la región fisiográfica de las tierras altas cristalinas. Es decir, está constituida por serpentinitas, gneises metamórficos y esquistos, con algunas pequeñas áreas de material plutónico, principalmente granito.

Presenta alturas que van desde los 50 a los 1 800 msnm. “El drenaje superficial es del tipo dendrítico, subparalelo y angular; en el área se encuentran principalmente drenajes subparalelos y subdendriticos. Hay rocas ígneas, metamórficas, carbonatos y rocas clásticas. Su edad corresponde al Cretácico, Terciario y Cuaternario; existen principalmente rocas metamórficas”<sup>6</sup>

Las pendientes que presenta el área de estudio son mayores de 55 %, en algunos casos, mayores al 80 %. La mayor parte de las pendientes son homogéneas, lo que permite observar laderas de longitudes similares, y sin mayores variaciones del microrrelieve. La altitud máxima de este paisaje es de 1 584 msnm.

---

<sup>5</sup> EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.156.

<sup>6</sup> *Ibíd.* p.139.

Estas unidades pueden verse expuestas a procesos fuertes de erosión, principalmente si existe remoción de la cobertura vegetal; en el caso del cerro Las Mesitas, aquí se ubicará uno de los tajos de aprovechamiento de extracción de mineral (Guapinol Sur). “Es una zona con pendientes moderadas de 36 % a 55 %, con relieves accidentados en su mayoría uniformes. En la región límite entre este paisaje y las laderas moderadamente escarpadas está ubicada la planta de procesamiento del proyecto”<sup>7</sup>.

### **2.1.3. Geología**

Tectónicamente, Guatemala se encuentra posicionada dentro de tres placas tectónicas, causantes de los procesos geológicos importantes presentes en la zona. En dirección este-oeste, en el norte del país se encuentra la división tectónica entre el bloque Maya que forma parte de la placa de Norteamérica y el bloque Chortís que pertenece a la placa del Caribe. “La separación de las placas, es por medio de la megasutura: zona de falla Polochic-Motagua. La cual, presenta un movimiento transformante sinistral formando una estructura con dirección este-oeste”<sup>8</sup>.

La base del Bloque Maya está formado por rocas metamórficas del paleozoico. Mientras, el bloque Chortís forma la parte continental sur de Guatemala y la parte oriental de la placa del Caribe. Al sur de Guatemala, la placa del Caribe se encuentra subducida por la placa de Cocos, forma un contacto con orientación al noroeste, como se ve en la figura 18.

Regionalmente, el área de estudio está subyacida por rocas metamórficas del Grupo Tambor. Esas rocas están cubiertas por rocas sedimentarias de la

---

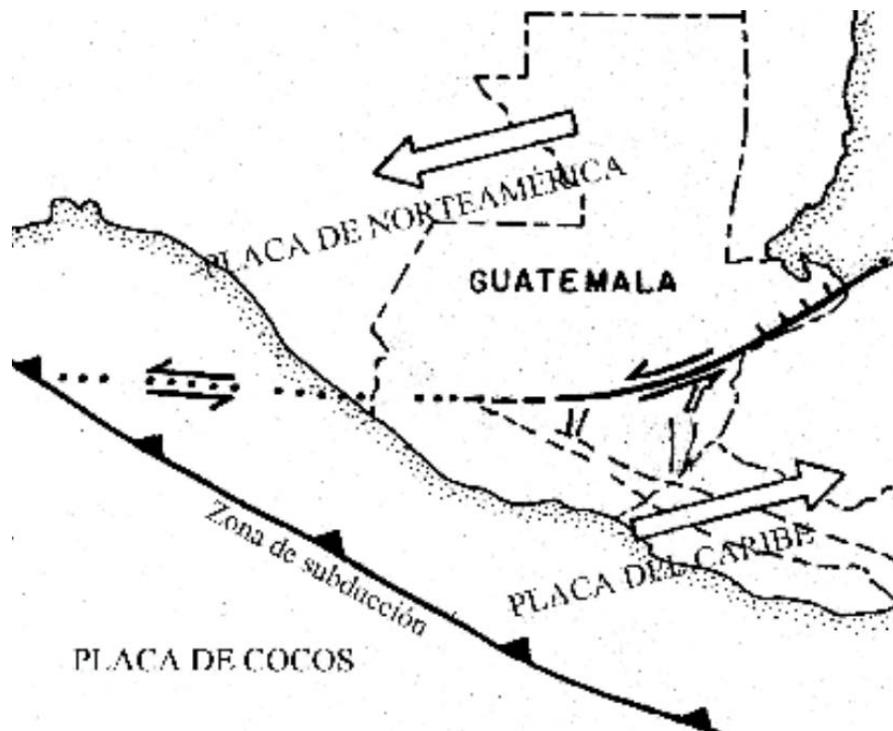
<sup>7</sup> EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.140.

<sup>8</sup> *Ibíd.* p.123.

formación subinal, rocas piroclásticas del terciario-cuaternario. Además, se encuentran intrusionadas por rocas plutónicas de composición granítica. La geología regional se obtuvo sobre la base del mapa geológico escala 1:250 000 de Guatemala, editado por el IGN en 1993.

Para describir la geología local del presente proyecto se analizó un área de 2,4 km<sup>2</sup> la cual, estructuralmente, se ubica al sur de la zona de falla del Motagua y al norte de la ciudad de Guatemala. Dicha ubicación da lugar a la conjugación de diferentes unidades litológicas, entre ellas las filitas de Grupo Tambor y conglomerados polimícticos de la formación subinal.

Figura 18. **Placas tectónicas dentro de Guatemala**



Fuente: INSIVUMEH. *Placas tectónicas en Guatemala*. <https://insivumeh.gob.gt/destacados-portada/marco-tectonico-para-guatemala/>. Consulta: Junio 2020.

El área de estudio se encuentra subyacente por anfibolitas, filitas, argilitas y lentes de caliza del Grupo Tambor. Las unidades de roca identificadas en el área de estudio para el presente se pueden describir a continuación:

- Formación El Tambor (Filitas): es la unidad de rocas metamórficas, más abundante del área. Consiste de filitas de color gris claro a oscuro. Son de grano fino con porfidoblastos de cuarzo y algunos de epidota dentro de una matriz de mica, cuarzo, epidota y ocasionalmente, de grafito.
- Formación subinal: está compuesta por conglomerado polimictico, con intercalaciones de limolita, lutitas y areniscas.
- Granito Tres Sabanas: en general, este granito está compuesto de cuarzomonzonita de textura granuda, que normalmente grada a granito y raramente a granodiorita y cuarzodiorita. “Esas rocas frecuentemente se encuentran intruidas por diques de pegmatita y ocasionalmente de rocas máficas. Aunque también, se observan diques recientes de composición andesítica y riolítica, los cuales frecuentemente se encuentran meteorizados”<sup>9</sup>. Este tipo de depósito presente en la zona es de mucho interés, porque representa el material pétreo para el diseño de mezcla para la aplicación futura de esta investigación. Es un yacimiento con cercanías al área. Se puede identificar cada uno de los yacimientos en la figura 19.
- Flujos de basalto: esta unidad se encuentra expuesta al suroeste del área de estudio. La roca es de color gris oscuro a negro, con pátina de intemperismo de color café rojizo. La textura es vesicular. Aunque, se

---

<sup>9</sup> RITCHIE, Andrew; MCDOWELL, Francis. *Ages of plutonic rocks from the volcanic high lands of Guatemala northwest of Guatemala City. Isochron West.* p.69.

pueden observar fenocristales de plagioclasas y olivinos, dentro de matriz fina.

- Tobas pomáceas: extensos depósitos de tobas pomáceas cubren gran parte de las rocas del área, principalmente hacia el este, aunque existen pequeños parches de estas rocas en el centro del área. Dichas rocas fueron originadas por la actividad volcánica durante el cuaternario inferior, transportadas por agua y viento y depositadas sobre el basamento metamórfico y granítico del área.
- Aluvión: esta unidad es la más reciente del área de estudio, se le encuentra ampliamente extendida en los lechos de quebradas y ríos. La mayor parte está constituida por toba pomácea retrabajada, clastos de filitas, granito y diorita (ver mapa geológico regional).
- Mineralización: “En Guatemala se definen cuatro regiones o distritos mineros: La región occidental, región norte, región oriental y la litoral del pacífico, dentro de ellas existen aéreas que tienen minerales con potencial de ser explotados”<sup>10</sup>.

La mineralización en el área de estudio está relacionada a procesos orogénicos, en donde se generan depósitos de oro diseminado de alta ley. “Específicamente en el área, la mineralización está contenida en vetas y brechas silicificadas de cuarzo de origen mesotermal con alto contenido de oro y arsenopirita, alojadas en metasedimentos y roca verde. Las vetas de cuarzo son el resultado del relleno de fallas”<sup>11</sup>.

---

<sup>10</sup> EXMINGUA. *Clasificación minera en Guatemala*. p.18.

<sup>11</sup> *Ibíd.* p.130.



#### **2.1.4. Hidrografía**

La hidrografía de la microcuenca del río Los Achiotes tiene como cauce principal el río que lleva su mismo nombre y que este a su vez tiene desembocadura en el río Motagua, estudios realizados en el año 2009 se observó que la mayor parte del cauce es de tipo aluvial, además los pequeñas drenajes de agua subsuperficial y subterránea (manantiales) dan la pauta que el sistema de drenaje del río Los Achiotes (Quebrada Poza del Coyote y Quebrada Agua Zarca, corrientes tributarias del cauce principal) presenta características de tipo influente y efluente, debido a que la corriente superficial se ve favorecida por el drenaje de agua que la alimenta producto de los flujos subsuperficial y subterránea; y luego la pendiente suave que presenta en un alto porcentaje el cauce (4,12 %) y el lecho de tipo aluvial en el fondo del mismo favorece que el agua recorra a una menor velocidad, favoreciendo el proceso de infiltración tomando características de río influente.

#### **2.1.5. Uso de suelo**

Según estudios previos, para la aprobación del estudio de impacto ambiental en el año 2010 se efectuaron estudios para determinar los usos del suelo en la región. Se estableció que los usos predominantes del área son el bosque de tipo secundario con diferentes grados de densidad, el cual funciona en algunos lugares como un bosque de galería en los cauces de los ríos. Se considera apropiado para conservar las áreas cercanas a la rivera del río. Aunque no es continuo sino segmentado y en algunos lugares es poco denso y disperso, este uso es el mayoritario en el área de estudio (más del 70 %). Los matorrales son otro uso considerable a tomar en cuenta. Algunos son utilizados como tierras de pastoreo, pero en su mayoría con usos poco definidos (este uso representa más del 10 %). En el caso del centro poblado es un área bien definida poco densa

de casas de construcción formal. Se encuentran dispersos en el área, ubicados en la parte suroeste.

## **2.2. Descripción hidrológica de la microcuenca del río Los Achiotos**

La hidrología de la microcuenca del río Los Achiotos está limitada a un solo afluente superficial principal y permanente que lleva su mismo nombre. Tiene un clima seco que hace que en promedio presente los 1 000 mm de lluvia al año, característico de las zonas nororientales del país.

### **2.2.1. Características hidrológicas**

Como se mencionó en el capítulo 1, en Guatemala existen 38 cuencas hidrográficas, las cuales están divididas en tres vértices: del Pacífico, del Atlántico y del Golfo de México. Nuestra área de interés pertenece a vertiente del Atlántico.

#### **2.2.1.1. Macrocuencas y subcuencas**

La cuenca del Motagua es una de las más grandes del país, con una superficie aproximada de 12 719 km<sup>2</sup>, la más larga de Guatemala. La desembocadura de su afluente principal es en las costas de Honduras.

La microcuenca del río Los Achiotos pertenece al sistema hidrográfico de la cuenca del Motagua, cuenta con un caudal de 5,5 l/s equivalente a 19,8 m<sup>3</sup>/hora y presenta una pendiente media de 4,12 % a lo largo de su cauce principal.

### **2.2.1.2. Red fluvial**

La red fluvial de la microcuenca del río Los Achiotos la podemos observar en la figura 22. Está conformada por las quebradas Poza del Coyote y Agua Zarca, que aguas abajo se fusionan y forman la quebrada La Barranca. Al aforar este punto (de unión de estas quebradas) es de 2,84 L/s.

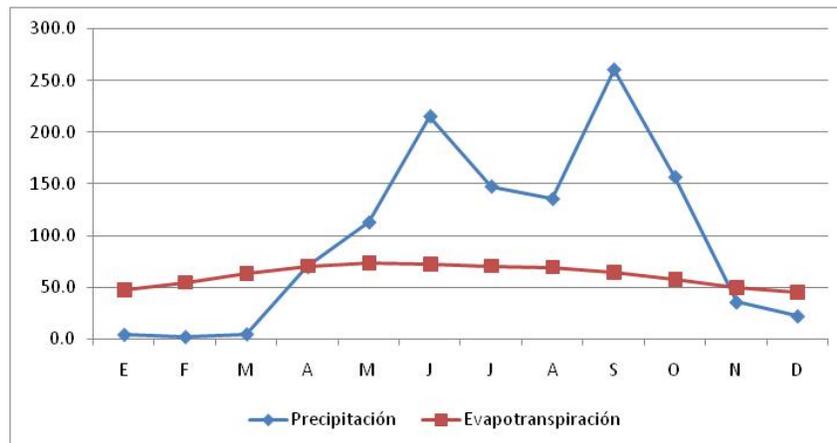
Aguas abajo, la quebrada La Barranca se fusiona con el río Los Achiotos para formar parte del afluente principal de dicha microcuenca. En la figura 17 muestra de manera más general de la distribución de toda la red fluvial.

### **2.2.1.3. Climatología**

El clima del área en general es cálido, característico de los climas del corredor seco de la cuenca del río Motagua. Puede ser caracterizado a partir de las estaciones climáticas existentes en el área. Si bien no hay ninguna estación climática específica para el área de estudio, se pueden hacer inferencias a partir de la estación de San Pedro Ayampuc, la cual en función de su altitud y cercanía es la más adecuada para el análisis. La estación San Pedro Ayampuc se encuentra localizada en 773 997,2 E, 1 635 177,6 N a una altitud de 1 200 msnm. Esta estación puede explicar en buena manera el clima del área de estudio.

En la figura 20 se muestra el climadiagrama del área, en donde se observa claramente los meses de déficit o escasez de agua en el ambiente, es decir los meses más secos del año, los cuales inician en noviembre y terminan en abril. Los meses de mayo a mediados de noviembre son regularmente lluviosos; la precipitación tiene el comportamiento bimodal típico del resto del país, es decir, que hay un ligero descenso de la precipitación en el mes de julio donde se presenta una canícula. La lluvia se distribuye en 114 días.

Figura 20. **Climadiagrama de la estación de San Pedro Ayampuc**



Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p. 155.

“La evapotranspiración potencial del área es de aproximadamente 2 mm/día, lo que equivale a climas templados, con una humedad relativa del 73,1 %”<sup>12</sup>.

#### 2.2.1.4. Lluvia

El área de interés está dividida en dos regiones con características hidrológicas diferentes:

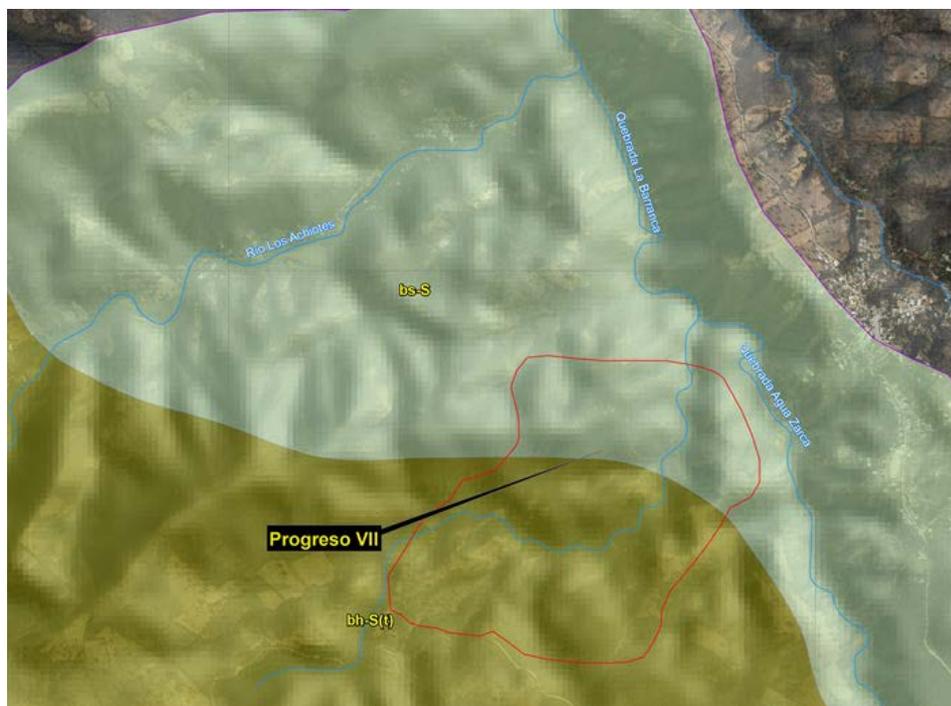
- Bosque seco subtropical (bs-S): la época de lluvias corresponde especialmente a los meses de junio a octubre, en que llegan a ser las precipitaciones más importantes en esta región. La precipitación en esta formación varía entre 500 mm y 1 000 mm y como promedio total anual 855 mm. La biotemperatura media anual es de 19 °C y 24 °C. La relación

<sup>12</sup> EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.150.

de evapotranspiración potencial es de alrededor de 1,5. La elevación varía entre 0 hasta 1 200 msnm.

- Bosque húmedo subtropical templado (bh-S(t)): n esta zona el período en que las lluvias son más frecuentes corresponde a los meses de mayo a noviembre, varían en intensidad según la situación orográfica que ocupan las áreas de la zona. La precipitación oscila entre los 1,100 y 1 349 mm, la biotemperatura oscila entre los 20 °C y 26 °C. La relación de evapotranspiración potencial es de alrededor de 1,0; es decir, que la evapotranspiración potencial es similar a la precipitación pluvial en el área.

Figura 21. **Regiones hidrológicas de la microcuenca del río Los Achiotés**



Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p. 153.

## 2.2.2. Aguas superficiales de la Microcuenca del río Los Achiotos

Para tener referencias de los caudales que drenan en las corrientes superficiales en la microcuenca del río Los Achiotos se definieron siete puntos de aforo. En la figura 22 podemos observar la distribución de estos puntos dentro de la microcuenca del río Los Achiotos.

Figura 22. Puntos de aforo de la microcuenca del río Los Achiotos



Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p. 157.

El departamento de investigación y servicios hídricos del Instituto Nacional de Sismología Vulcanología, Meteorología e Hidrología INSIVUMEH, 2005 en

cooperación con el Instituto Nacional de Electrificación (INDE), desarrollaron la red hidrológica a nivel de cuencas y subcuencas de Guatemala, estableciendo las isolíneas con base en registros de caudales medios mensuales. Con base en ello se puede inferir los siguientes valores

“Para la microcuenca del río Los Achiotos (área 43,29 km<sup>2</sup>), estableciendo que el caudal específico medio anual es 20 l/s/km<sup>2</sup>, equivalente a 865,8 l/s en el punto de aforo final (Punto 1). caudal específico en año húmedo 20 l/s/km<sup>2</sup>, equivalente a 865,8 l/s; caudal específico en año seco 10 l/s/km<sup>2</sup>, equivalente a 432,9 l/s; caudal específico en el mes crítico 2 l/s/km<sup>2</sup>, equivalente a 86,58 l/s; caudal específico superado en el 90 % del tiempo 2,5 l/s/km<sup>2</sup>, equivalente a 108,22 l/s. la disponibilidad del recurso hídrico superficial en esta zona es bajo, ya que la lluvia en el área es alrededor de los 500 a 900 mm/año, con un promedio de 125 días año”<sup>13</sup>.

### **2.2.3. Aguas subterráneas de la microcuenca del río Los Achiotos**

Según el MAGA 1991, “Guatemala desde el punto de vista hidrogeológico puede ser dividida en cuatro distintas regiones, las cuales aproximadamente coinciden con las mayores provincias fisiográficas, las cuales son: Las llanuras aluviales de la costa del pacífico; el altiplano volcánico; las tierras altas cristalinas; y por último la región sedimentaria septentrional”.

La parte alta de la microcuenca del río Los Achiotos está dentro de la región hidrogeológica de las tierras altas volcánicas (el altiplano volcánico) en el límite norte. La parte media y baja se encuentra en la región de las tierras altas cristalinas (metamórficas) y dentro de esta se encuentra el área donde se localiza

---

<sup>13</sup> EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.163.

el proyecto Progreso VII Derivada. Los materiales que poseen un grado de fracturación y poseen una porosidad primaria favorecen la circulación del agua dentro de la matriz, lo que las constituye zonas de recarga y en esta área favorecen las zonas de descarga por su baja permeabilidad en los contactos con las primeras de origen metamórfico: filitas, esquistos e intrusivas graníticas.

Los resultados de un sondeo eléctrico vertical realizado en el área del proyecto para determinar con mayor precisión la existencia de un manto acuífero explotable en región, nos indican que desde la superficie del suelo hasta una profundidad de los 28 m aproximadamente hay presencia de materiales de tipo aluvial, con variaciones de resistencia, infiriendo que hay variaciones de humedad y subyaciendo a esta capa se presenta un estrato mayor de 100 m de espesor, con una alta resistividad mayor a los 400  $\Omega$ -m, interpretándose como materiales metamórficos fracturados. A una profundidad mayor a los 132 m los valores de resistividad muestran un descenso hasta alcanzar 7  $\Omega$ -m, lo que indica que hay presencia de una zona con alta conductividad eléctrica o un estrato saturado de agua, el cual se extiende a una mayor profundidad.

#### **2.2.4. Recurso hídrico**

Dentro de los dos sistemas de drenaje (quebrada Poza del Coyote y quebrada Agua Zarca) que rodean los sitios del proyecto no hay presencia de manantiales o brotes de agua. La pendiente del área es mayor al 50 %, por lo que se aduce que en cuanto a la producción de agua subterránea esta área no es de importancia. “Se puede considerar que el agua que descarga dentro del área de la microcuenca del río Los Achiotos proviene de la recarga de la cuenca hidrogeológica que se encuentra más al sur de esta, específicamente en la línea divisoria de la vertiente del Pacífico y del Atlántico, dado a las características de precipitación > 1000 mm/año estación INSIVUMEH zona 13, materiales

piroclásticos (Altiplano volcánico), pendientes < 40 %, lo que favorece el proceso de infiltración”<sup>14</sup> .

#### **2.2.4.1. Oferta hídrica**

Según monitorios que se realizaron, dentro de esta área (aguas abajo de donde se localizan los posibles sitios de extracción minera) específicamente en los contactos se observó una serie de pequeños drenajes de agua que brotan (manantiales), y son los que alimentan el drenaje de agua superficial permanente en las quebradas Poza del Coyote y Agua Zarca, por lo que se asume que a esta profundidad (> 100 m), podría estar presente uno de los acuíferos de la zona. Esto tomando como referencia los brotes de agua en los cauces del río (Contactos litológicos) y además por el sondeo eléctrico realizado por la empresa Exploraciones Mineras de Guatemala S.A. en donde se indica que los “Valores de mayor transmisividad se alcanzan a profundidades mayores a los 100 m”<sup>15</sup>

De acuerdo a los valores de precipitación en la microcuenca del río Los Achiotés (Media de 1164 mm/año) y el área de la microcuenca del río Los Achiotés de 43,29 km<sup>2</sup>, “Se estima una precipitación de 50 389 560 m<sup>3</sup>/año, en toda el área. Con base en los resultados del análisis de la recarga potencial tenemos una recarga en el área 71 440 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año, cuyo valor, la clasifica en recarga potencial específica baja (50 000 a 100 000 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>/año)”<sup>16</sup>

Este resultado se ve influenciado por la presencia de bosque espinoso, pendientes (> 50 %), baja capacidad de infiltración, que favorecen la escorrentía superficial y disminuye la infiltración del agua al subsuelo.

---

<sup>14</sup> EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.150.

<sup>15</sup> *Ibíd.* p.172.

<sup>16</sup> *Ibíd.* p.176.

#### **2.2.4.2. Demanda hídrica**

Atendiendo a la demanda de agua requerida por el proceso industrial a que se refiere el proyecto y con base en estudios geofísicos, “Se recomienda la perforación de un pozo mecánico, con un diámetro de entubado no menor a 4”, ubicado en las coordenadas 781 129 E, 1 635 548 N. El pozo deberá ser excavado a una profundidad no menor a 250,00 m, estimando la presencia de un acuífero explotable a una profundidad de aproximadamente 132,00 m”<sup>17</sup>.

Para la realización del estudio hidrogeológico se empleó un método de investigación del subsuelo conocido como sondeo eléctrico vertical. Este método se basa en la propiedad que tienen los suelos y rocas de la corteza terrestre de presentar resistencia al paso de una corriente eléctrica, la cual crea un campo electromagnético.

En el área, aproximadamente a 2,00 km del sitio propuesto para la perforación del pozo, se localiza un pozo mecánico, perforado para surtir de agua entubada a la población de San José del Golfo perforado a una profundidad aproximada de 1 000 pies

El proyecto minero Progreso VII Derivada para la realización de sus actividades industriales tiene una demanda diaria de 848,80 m<sup>3</sup>/día. Como se indicó anteriormente esta demanda es cumplida por un pozo mecánico que se encuentra dentro de las instalaciones del proyecto.

---

<sup>17</sup> EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.63.

### 2.2.4.3. Uso del recurso hídrico

El uso del recurso hídrico en la región abarcando los poblados cercanos y el área del proyecto son variados, desde los que van el uso doméstico (Habitantes de la región) hasta para el uso de la industria (Proyecto minero Progreso VII Derivada). Dentro del uso doméstico que los pobladores le dan al agua van: Higiene personal y riego de miniparcelas, en el apartado 2.2.5 se menciona las limitantes del uso del agua para el consumo humano.

Dentro de la actividad del proyecto minero Progreso VII Derivada tenemos una demanda diaria de 84,80 m<sup>3</sup>/día, misma que es suministrada por un pozo de agua potable. En la tabla XII se muestra un desglose de la demanda hídrica dentro de las instalaciones del ya mencionado proyecto.

Tabla XII. **Demanda diaria de agua del proyecto Progreso VII Derivada**

<b>Actividad</b>	<b>Demanda</b>
Actividad humana:	4,8 m <sup>3</sup> /día (asumiendo 60 personas)
Control de polvo en trituradoras:	5,00 m <sup>3</sup> /día
Riego de camino y perforaciones:	10,00 m <sup>3</sup> /día
Procesamiento (Agua de reposición):	50,00 m <sup>3</sup> /día (20 % del Consumo total de la planta)
Vivero, áreas verdes:	5,00 m <sup>3</sup> /día
<b>Total de agua/día:</b>	<b>84,80 m<sup>3</sup>/día</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

#### 2.2.4.4. Calidad del agua

Para la determinación de la calidad del agua tanto superficial como subterránea se realizaron en la zona diferentes muestreos para la determinación de los LMP y LMA de área en cuestión.

- Calidad del agua subterránea: para determinar la calidad del agua subterránea, se realizó un muestreo a un pozo existente, y que es propiedad de la municipalidad de San José del Golfo y que además suministra parte de la demanda de la población (782 005 N, 1 633 922 E), y así llevar a cabo la caracterización de la calidad del agua que la población utiliza para el consumo. Los análisis se basaron en la norma COGUANOR NGO 29 001; determinándose características físicas, químicas, límites de toxicidad y sustancias no deseadas.

Tabla XIII. **Características físicas del pozo Agua Zarca**

Características	Dimensionales	Pozo Agua Zarca (QGW-01)	Límites COGUANOR	
			LMA	LMP
Color	uPtCo	NA	5,00	35,00
Olor	Rechazable / No rechazable	No rechazable	No rechazable	No rechazable
Sabor	Rechazable / No rechazable	No rechazable	No rechazable	No rechazable
Turbiedad	UNT	7,00	5,00	15,00
Conductividad Eléctrica	µS/cm	306,60	100,00	750,00

Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.193.

En general, las características de la calidad de agua del pozo en cuestión (llamado por también pozo Agua Zarca) se encuentra dentro del rango del límite

máximo aceptable y el límite máximo permisible; tal y como se muestra en las tablas XIII y XIV.

- Calidad del agua superficial: para la determinación de la calidad del agua superficial en el área en estudio se tomó un punto intermedio, ya que representa todo el escurrimiento aguas arriba en época lluviosa y representa un punto de interés por encontrarse cercano a las áreas de extracción.

Tabla XIV. **Características químicas del pozo Agua Zarca**

Características	Dimensionales	Pozo Agua Zarca (QGW-01)	Límite COGUANOR	
			LMA	LMP
Aluminio	mg/l	0,03	0,05	0,10
Calcio	mg/l	6,75	75,00	159,00
Zinc	mg/l	0,05	3,00	70,00
Cloro residual libre	mg/l	NA	0,50	1,00
Cloruro	mg/l	< 2,50	100,00	250,00
Cobre	mg/l	< 0,50	0,05	1,50
Dureza Total (CaCO <sub>3</sub> )	mg/l	50,00	100,00	500,00
Magnesio	mg/l	7,95	50,00	100,00
pH	und	8,18	7,00-7,50	6,50 – 8,50
Sólidos totales disueltos	mg/l	256,00	500,00	1 000,00
Sulfato	mg/l	48,00	100,00	250,00
Temperatura	°C	NA	15 – 25	34,00

Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.193.

Al analizar los resultados de la tabla XV se puede observar detenidamente que los niveles de alcalinidad (total) son elevados, con valores cercanos a los

450 miligramos por litro de carbonato de calcio. Esto indica que la concentración de bicarbonatos no está tan diluida, pero que aún contiene suficientes iones de calcio para mantener un pH levemente elevado ( $\text{pH} \geq 8$ ). En este mismo cuadro se puede observar que los valores de conductividad también se encuentran elevados en la quebrada ( $> 450 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). “Esta variable depende de la cantidad de sales disueltas presentes en un líquido y es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración de sólidos disueltos, mayor será la conductividad”<sup>18</sup>.

Tabla XV. **Parámetros fisicoquímicos de las aguas superficiales**

Parámetros	Unidades	Límite de detección	QSW-01
Alcalinidad	mg/l - CaCO <sub>3</sub>	5,00	441
Bicarbonatos	mg/l - HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,00	269
Calcio	mg/l - Ca	0,38	15,19
Carbonatos	mg/l - CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	1,00	< 1,00
Cloruros	mg/l - Cl <sup>-</sup>	2,50	4,20
Cianuro	mg/l - CN <sup>-</sup>	0,01	< 0,01
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$ @ 25°C	0,10	453,80
Dureza	mg/l - CaCO <sub>3</sub>	1,00	89,00
Fluor	mg/l - F <sup>-</sup>	0,10	1,00
Hierro	mg/l - Fe	0,08	0,21
Magnesio	mg/l - Mg	0,04	12,41
Manganeso	mg/l - Mn	0,018	0,034
Nitratos	mg/l - NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,90	12,20
Nitritos	mg/l - NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,01	< 0,01
Sólidos Disueltos	mg/l	10,00	300,00
Sólidos Suspendidos	mg/l	10,00	< 10,00
Sólidos Totales	mg/l	10,00	348,00
Sulfatos	mg/l - SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	25,00	48,00
Turbidez	Unt	0,50	7,00

Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.183.

<sup>18</sup> EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.182.

La dureza debida por las sales de carbonatos, bicarbonatos, cloruros y ocasionalmente nitratos de calcio y magnesio, mantienen los niveles menores a los 100 mg/l CaCO<sub>3</sub>, clasificada como un agua blanda (< 100 mg/l CaCO<sub>3</sub>).

Los niveles naturales de nitratos en aguas superficiales y subterráneas son generalmente de unos pocos miligramos por litro. Pero al observar los resultados obtenidos en el muestreo (> 10mg/l NO<sub>3</sub>-), se puede insinuar que el incremento de los niveles de nitratos es debido a la intensificación de las prácticas agrícolas en la parte media de la cuenca. “Los sulfatos se encuentran en las aguas naturales en un amplio intervalo de concentraciones dependiendo de la oxidación de los sulfuros de muchos elementos cuando estos entran en contacto con el oxígeno del aire”<sup>19</sup>.

Por las características geológicas del área existe la posibilidad de que los valores de sulfato que se registraron estén ligados a la oxidación de minerales y no aportaciones de fertilizantes, ya que la agricultura en esta área está limitada.

### **2.2.5. Problemática de la hidrología general de la región**

La hidrología en la región en estudio se ve afectada por la mineralogía presente en las rocas, como resultado a los procesos geológicos y a la formación de suelos que hacen que la presencia de algunos minerales esté por arriba de los límites máximos permisibles, que al ser ingeridos pueden ocasionar serios problemas a la salud. Estos minerales son el arsénico y el hierro.

La presencia de estos minerales fuera de los parámetros ha sido la principal problemática en la región, ya que por las propiedades de disolvente universal del agua hacen que esta no sea apta para el consumo, más solo para las actividades

---

<sup>19</sup> EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.183.

diarias. Siendo de necesarios la implementación de procesos para minimizar estos valores.

Tabla XVI. Límites de toxicidad del pozo Agua Zarca

Sustancia	Dimensionales	Pozo Agua Zarca (QGW-01)	Límite COGUANOR
			LMP
<b>Arsénico</b>	<b>mg/l</b>	<b>0,084</b>	<b>0,01</b>
Bario	mg/l	NA	0,70
Boro	mg/l	< 0,10	0,30
Cadmio	mg/l	< 0,002	0,003
Cianuro	mg/l	< 0,01	0,07
Cromo	mg/l	< 0,05	0,05
Mercurio	mg/l	< 0,003	0,001
Plomo	mg/l	< 0,10	0,01
Selenio	mg/l	< 0,01	0,01

Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.194.

Tabla XVII. Sustancias no deseadas del pozo Agua Zarca

Sustancia	Dimensionales	Pozo Agua Zarca (QGW-01)	Límite COGUANOR	
			LMA	LMP
Fluoruro	mg/l	< 0,10	---	1,70
<b>Hierro</b>	<b>mg/l</b>	<b>2,49</b>	<b>0.1</b>	<b>1,00</b>
Manganeso	mg/l	0,102	0.05	0.50
Nitrato	mg/l	7,10	---	10,00
Nitrito	mg/l	0,02	---	1,00

Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.194.

En las tablas XVI y XVII se observa que tanto los niveles de arsénico y hierro superan los límites establecidos para el consumo humano, lo cual podría ocasionar problemas de salud en la población.

En cuanto la presencia de estos minerales en estos valores de concentraciones no afecta para el proceso dentro del proyecto, por lo que hace que sea idónea para su uso.



### **3. PAVIMENTOS PERMEABLES**

#### **3.1. Tipos de pavimentos permeables**

Los pavimentos permeables son aquellos en los cuales son propicios para que el agua pase a través de ellos sirviendo como filtro, no afectan en gran medida el proceso de infiltración del agua y evitan inundaciones. Hay de dos tipos: modulares (adoquines) y continuos (pavimento de concreto hidráulico o concreto asfáltico).

##### **3.1.1. Adoquines**

Según su acepción, “Adoquín de concreto, elemento compacto de concreto, prefabricado, con la forma de prisma recto, cuyas bases pueden ser polígonos, que permiten conformar superficies completas como componente de un pavimento articulado, estos pueden ser bicapa o monocapa”<sup>20</sup>.

El adoquín es un elemento que se fabrica al depender de su uso, este puede ser para tráfico liviano o pesado. Asimismo, en el mercado, los adoquines pueden variar su forma y color, según las necesidades que se quieran suplir. Los pavimentos compuestos por adoquines poseen propiedades permeables, durante el proceso de colocación, los elementos se colocan dejando una separación entre sí, la cual es llenada con agregados finos, con el objetivo de brindarle estabilidad al pavimento y, al mismo tiempo, posee la función de filtrar el agua de lluvia hacia el suelo soporte.

---

<sup>20</sup> LOPEZ RAMIREZ, Randy Sujey. *Fabricación de adoquín con adición de escoria de mata de níquel como agregado fino*. p.2.

### **3.1.2. Concretos hidráulicos permeables**

El concreto permeable es un tipo especial de concreto con una alta porosidad, usado para aplicaciones en superficies de concreto que permita el paso a través de él de agua proveniente de precipitaciones y otras fuentes, reduce la escorrentía superficial de un sitio y recarga los niveles de agua subterránea. La alta porosidad se obtiene mediante un alto contenido de vacíos interconectados. Normalmente el concreto permeable tiene poco o nulo contenido de agregados finos y tiene la suficiente cantidad de pasta de cemento para cubrir las partículas de agregado grueso preservando la interconectividad de los vacíos. “El concreto permeable es usado tradicionalmente en áreas de estacionamientos, áreas con poco tráfico, pasos peatonales e invernaderos”<sup>21</sup>

El concreto hidráulico permeable no debe utilizarse en área de tráfico pesado, ya que puede llegar a facturarse fácilmente debido a la gran cantidad de poros con los que esta cuenta. Además, es recomendable utilizar cemento estructural (5 000 psi) en la mezcla de este concreto, ya con este tipo de cemento se poseerá una mejor adherencia entre los agregados gruesos que conforman los vacíos. De la misma manera, comúnmente son utilizados en banquetas, parqueos y encaminamientos.

### **3.1.3. Mezclas asfálticas permeables**

Las mezclas asfálticas drenantes son aquellas mezclas asfálticas cuyo porcentaje de vacíos es lo suficientemente alto para permitir que a través ellas se filtre el agua con rapidez y pueda ser evacuada hacia las bermas, cunetas y otros elementos de drenaje. Se evita así su permanencia en la superficie de la vía (capa de rodadura), incluso bajo precipitaciones intensas y prolongadas. Para

---

<sup>21</sup> National Ready Mixed Concrete Association. *Mezclas de concreto*. p. 1.

que una mezcla pueda considerarse como drenante debe tener un contenido inicial de vacíos del 16 %, el cual permite una permeabilidad adecuada en este tipo de mezclas. Para que la capacidad de drenaje se mantenga durante un período de tiempo razonable, lo aconsejable es partir de una mayor relación de vacíos de la mezcla con el fin de aumentar la permeabilidad. “Las mezclas drenantes pueden construirse tanto en caliente como en frío, empleando como ligantes los betunes puros o las emulsiones asfálticas, modificadas o no”<sup>22</sup>.

Del mismo modo, en las mezclas asfálticas permeables se utiliza una granulometría de agregados gruesos convenientes, con el fin de obtener la mayor cantidad vacíos en el concreto, y así poder drenar de una forma adecuada y constante el agua, proveniente de las precipitaciones.

También es importante considerar que el agua es el mayor causante de daños de las mezclas asfálticas, ya que esta causa cambios físicos y químicos al provocar deterioro. Igualmente, las mezclas asfálticas permeables deben ser resistentes a estos daños provocados por el agua.

### **3.2. Elementos de la estructura portante para pavimentos permeables**

Son todos aquellos los que sirven de soporte para el pavimento distribuyendo de forma uniforme las cargas recibidas y drenando de forma eficaz toda humedad que entre en contacto en ella. Estos elementos realizados adecuadamente, le brindan estabilidad al pavimento y resistencia al deterioro por el paso del tiempo.

---

<sup>22</sup> ZAMBRANO MEDRANO, Byron Aladin. DELGADO GUTIERREZ, Daniel Alfredo. ORTIZ HERNANDEZ, Eduardo Humberto; JALIL PONCE, Jorge Eduardo. *Mezclas asfálticas drenantes y su aplicación en las carreteras de Manabí*. p.4.

### **3.2.1. Capa granular**

Las bases granulares son permeables debido a que están compuestas por agregados gruesos, al formar vacíos por los cuales se facilita el paso del agua. Igualmente, para aumentar la permeabilidad, es posible utilizar grava de mayor tamaño para aumentar el tamaño de los vacíos, pero esta base debe ser mezclada con un elemento el cual mantenga unidas las partículas de grava, y este puede ser cemento.

- Subbase granular: es la capa formada por la combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural, clasificados o con trituración parcial para constituir una subbase integrante de un pavimento. Está destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad el efecto de las cargas del tránsito proveniente de las capas superiores del pavimento, de tal manera que el suelo de subrasante las pueda soportar.
- Base granular: “Es la capa formada por la combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural, clasificados o con trituración parcial para constituir una base integrante de un pavimento”<sup>23</sup>.

### **3.2.2. Geosintéticos y geoplásticos**

Los geotextiles se pueden definir como un material textil plano, permeable y polimérico, que se emplean en contacto con suelos y otros materiales para aplicaciones geotécnicas en ingeniería civil. Los polímeros utilizados en la fabricación de geotextiles suelen ser de origen sintético debido a su mayor

---

<sup>23</sup> Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. *Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes*. p.304.

durabilidad frente a los naturales. Los principales son las poliamidas, poliésteres y las poliolefinas (polietileno y polipropileno).

Los geotextiles se caracterizan por desarrollar varias funciones simultáneas una vez colocados en el terreno. Esta propiedad les garantiza una posición ventajosa frente a otros sistemas o productos que existen en el mercado:

- Filtración: el geotextil retiene las partículas de grano fino al fluir el agua de la capa de grano fino a la capa de grano grueso.
- Separación: separa dos capas de suelo de diferentes propiedades físicas (granulometría, plasticidad, consistencia) y así evita la mezcla de materiales.
- Drenaje: el geotextil conduce y evacua líquidos (agua) e incluso gases en su mismo plano.
- Refuerzo: aumenta la capacidad portante (resistencia al corte) del suelo y la estabilidad en la construcción.
- Protección: “El geotextil protege a membranas y otros productos relacionados contra ataques físicos (perforaciones y desgaste)”<sup>24</sup>.

El geotextil es un tejido sintético permeable, el cual comúnmente se puede confundir con la geomembrana, este último posee como función principal impermeabilizar. La aplicación del geotextil en carreteras es la de separar la capa base granular o subbase granular del suelo que los soporta y, al mismo tiempo,

---

<sup>24</sup> BALLESTER, Rafael, CASTRO CALVO, Jesus & GIL, Dolores. *Análisis físico-mecánico de mezclas densas en caliente*. p.30.

permite que fluya el agua hacia el suelo sin mezclar los materiales, pues el tejido fino del cual está compuesto, no permite el paso de los agregados. El geotextil es resistente a la degradación, debido a sus componentes sintéticos.

### **3.2.3. Drenajes**

Los drenajes son elementos de mucha importancia para construir una estructura vial, al poseer la correcta evacuación de la escorrentía, se garantiza prologar la vida de las carreteras. Igualmente, para la construcción de drenajes existe una gran variedad de materiales disponibles en el mercado como tubería PVC, concreto, metal, entre otros. Asimismo, para los drenajes subterráneos, se consideran los geotextiles y drenajes rellenos con agregados para facilitar la filtración, como los pozos de absorción.

“Una variante de esta son los subdrenajes. Que no son más que el drenaje de aguas subterráneas, que se construye de tuberías perforadas, geotextil y materiales pétreos para filtro, geocompuestos o simplemente de materiales pétreos (Drenaje Francés)”<sup>25</sup>.

### **3.2.4. Permeabilidad del suelo**

Las fuerzas de superficie de los granos determinan principalmente la fuerza de atracción entre las moléculas del fluido y las partículas de suelo; este fenómeno determina en gran medida la velocidad de humectación de un suelo, la porosidad y la relación de vacíos, que son los principales parámetros con los que se ha relacionado el valor de la permeabilidad en las expresiones existentes para su determinación. Se piensa que la cantidad de vacíos que tenga un suelo

---

<sup>25</sup> Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. *Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes*. p.601.

determinara en gran parte el valor de su permeabilidad, sin embargo, la tortuosidad de los canales es un elemento importante, ya que un fluido circula con mayor rapidez por un canal uniforme que por uno que presente una alta tortuosidad, a pesar de que su tamaño o vacíos sean los mismos.

“La permeabilidad puede variar por la estructuración del suelo; la estratificación ocasiona para valores de permeabilidad sean diferentes en cada estrato, incluso si se trata del mismo suelo con diferente grado de compactación o humedad, la permeabilidad seguramente será diferente”<sup>26</sup>.

Además, para los pavimentos permeables, es indispensable que el suelo posea una alta permeabilidad y sea estable cuando esté saturado, pues de lo contrario dañaría la estabilidad estructural de las cimentaciones del pavimento y estructuras cercanas, al provocar que estas se agrieten, se deformen o incluso se desplacen de su ubicación original, al generar como necesario una inversión económica no contemplada, para realizar correcciones y reparaciones en los pavimentos y estructuras cercanas.

### **3.3. Diseño estructural para pavimentos permeables**

Los pavimentos permeables nacen de la necesidad de hacer los proyectos constructivos más sustentables y amigables con el medio ambiente, minimizando el impacto que estos pueden ocasionar al entorno, también son una alternativa de mitigación del escurrimiento superficial y los caudales en horas pico.

En la actualidad existe una variada gama de software que facilitan el diseño de los pavimento, y todos ellos tienen en como parámetros en común: el tipo de

---

<sup>26</sup> ALVARES MANILLA, Alfonso, VALADEZ CASTRO, Juan Pablo; MARTINEZ PENA, Guadalupe. *La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes. Aplicación en la infraestructura del transporte.* p.17.

carga, periodo de vida útil, capacidad de las capas base y subbase y el caudal a drenar. Se toma como base de diseño la metodología propuesta por la AASTHO.

### **3.3.1. Requerimientos de carga y tráfico**

El tráfico estimado soportado por el pavimento permeable puede caracterizarse como la carga de un eje simple (ESAL's) equivalente a 18 000 lb, el promedio del tráfico diario, o el promedio diario de tráfico pesado. El tráfico de transporte pesado tiene un mucho mayor impacto en los pavimentos que el tráfico ligero, el estimado de camiones utilizados en el pavimento permeable es crítico para el diseño de pavimento de larga duración.

Dependiendo del programa de diseño de pavimentos utilizado, otros factores de diseño aparte del tráfico y resistencia del concreto pueden ser incorporados. Por ejemplo, si el procedimiento de diseño de AASHTO es utilizado, factores como la capacidad de servicio terminal, transferencia de cargas hacia las juntas, y ejes de soportes son aspectos fundamentales a tomar en cuenta. El factor de capacidad de servicio terminal para concreto permeable es consistente con el del pavimento convencional. En las juntas, los diseñadores deben de tomar en consideración las cargas por transferencia mediante un engranaje de grietas activo. Si existiesen curvas, banquetas, y plataformas o placas de hormigón, se recomienda utilizar los factores de pavimento con apoyo lateral.

De la misma manera, es recomendable la construcción de pavimentos permeables en vías de tráfico moderado y en los cuales no circule el transporte pesado, pues la estructura del concreto está compuesta por agregados gruesos unidos que forman vacíos, al estar expuesto este concreto a tráfico pesado, mediante el peso del tráfico y las vibraciones, esto puede provocar fracturas en

el concreto. Del mismo modo, comúnmente, se utiliza este concreto encaminamientos, banquetas o calles en las cuales únicamente transita tráfico liviano.

### **3.3.2. Diseño de la estructura de soporte**

La estructura soporte de un pavimento la conforman todas las capas inferiores a la carpeta de rodadura y dan el soporte necesario para desarrollar la capacidad para la cual fue diseñado. Este debe cumplir criterios tanto como físicos y mecánicos.

#### **3.3.2.1. Requerimientos de físicos y mecánicos**

- Valor soporte. Debe tener un CBR determinado por el método AASHTO T 193, mínimo de 40 para la subbase y de 70 para base, efectuado sobre muestras saturadas, a 95 % de compactación determinada por el método AASHTO T 180 y un hinchamiento máximo de 0,50 % en el ensayo efectuado según AASHTO T 193.
- Abrasión. La porción de agregado retenida en el tamiz 4,75 mm (No.4), no debe tener un porcentaje de desgaste por abrasión determinado por el método AASHTO T 96, mayor de 50 a 500 revoluciones.
- Partículas Planas o Alargadas. No más del 25 % en peso del material retenido en el tamiz 4,75 mm (No.4), pueden ser partículas planas o alargadas, con una longitud mayor de cinco veces el espesor promedio de dichas partículas.

- Impurezas. El material de subbase o base granular debe estar exento de materias vegetales, basura, terrones de arcilla o sustancias que incorporadas dentro de la capa de subbase o base granular puedan causar fallas en el pavimento.
- Graduación. El material para capa subbase o base granular debe llenar los requisitos de graduación, determinada por los métodos AASHTO T 27 y AASHTO T 11 (Descritos en la tabla II), para el tipo que se indique en las disposiciones especiales. El porcentaje que pasa el tamiz 0,075 mm (No.200), debe ser menor que la mitad del porcentaje que pasa el Tamiz 0,425 mm (No.40).

También es indispensable elegir un excelente material granular que cumpla con todas las disposiciones, tanto físicas como mecánicas, para la base y subbase en la construcción de pavimento de cualquier tipo, ya sea hidráulico, asfáltico, tradicionales o permeables, pues la base y subbase son los soportes principales del pavimento. Igualmente, esto debe considerarse en la práctica y colocación correcta del material granular, al utilizar la maquinaria adecuada y realizar los ensayos de calidad correspondientes.

### **3.3.2.2. Determinación de capa granular**

La construcción de subbases y bases de carreteras o pistas de aeronaves requiere un conocimiento geotécnico detallado de los materiales involucrados. En general, se utilizan principalmente materiales disponibles en el sector de emplazamiento de la obra, sobre los que se aplican técnicas de mejoramiento de suelos con el objetivo de mejorar su comportamiento y disminuir los espesores de diseño en cada una de las capas que forman el pavimento.

“La determinación del espesor de diseño del pavimento se realiza en función del comportamiento del suelo, caracterizado por el CBR o resistencia no confinada, y el índice de diseño. Si se emplean materiales estabilizados en alguna de las capas, puede reducirse el espesor requerido. El diseño de pavimentos con capas estabilizadas, por ejemplo, mediante el agregado de cemento, requiere la aplicación de factores de equivalencia a una capa o capas de material convencional. El factor de equivalencia representa el espesor de material convencional que puede sustituirse por un espesor unitario de material estabilizado”<sup>27</sup>.

El tipo de material granular, la magnitud de la obra, el tipo de tráfico que recibirá y la vida útil, son los factores que determinan el espesor, tanto de la mezcla de concreto como de la base y subbase.

Asimismo, en ocasiones no se puede elegir el tipo de material granular que se utilizará en un proyecto, debido a la ubicación lejana que este puede poseer y, transportar un material granular adecuado, representa gastos económicos los cuales encarecen el costo del proyecto; por lo cual, es factible la utilización de cemento para estabilizar este material granular desconocido, para darle las propiedades necesarias y, así, formar una base y subbase adecuadas para la obra.

### **3.3.3. Diseño de carpeta de rodadura para concreto hidráulico (ACI 522)**

En método ACI 522 para el diseño y la construcción de pavimentos permeables fue creado en el año 2008 bajo la denominación *Specification for*

---

<sup>27</sup> AIASSA, Gonzalo; ARRÚA, Pedro. *Diseño de mezclas de suelo compactado para la construcción de terraplenes*. p.45.

*pervius concrete pavement* en el cual se adoptaron normas de la ASTM para el control de calidad de los concretos permeables. El concreto permeable es un material fabricado de manera similar al concretos regular, pero utiliza menor o nula cantidad de finos (agregado fino) permitiendo así espacios entre sus partículas (agregado grueso).

### **3.3.3.1. Requerimientos de calidad del concreto**

Los requerimientos que debe cumplir el concreto serán similares al concreto convencional, ya que se quiere lograr la mayor resistencia con la mayor eficiencia de permeabilidad posible, por lo que debe cumplir con la relación de agua-cemento entre 0,28 y 0,40. De acuerdo al ACI 522R, el contenido de vacíos está en el orden de 15 % a 35 %, la resistencia a compresión entre 2,80 a 28 MPa, y la capacidad de drenaje en un rango de 81 a 730 litros/min/m<sup>2</sup>.

#### **3.3.3.1.1. Ensayos al material**

Se debe realizar muestras y ensayar los agregados de acuerdo con las normas ASTM descritas en la tabla XVIII, excepto que se indique de otra forma para la realización de las mismas. Se puede utilizar el mismo espécimen de ensayo para análisis de tamizado y para la determinación del material más fino que el tamiz 75  $\mu\text{m}$  (No.200). La utilización de tamaños separados por un análisis de tamizado es aceptable para ensayos de resistencia a disgregación a los sulfatos o de abrasión, sin embargo, se requiere la preparación adicional del espécimen de ensayo.

Además, se debe realizar ensayos a los materiales antes y durante la colocación de estos en la obra, pues de estos depende la durabilidad y el funcionamiento de una pavimentación. De la misma manera, debido a la gran

variedad de materiales existentes en una misma ubicación, es necesario estudiar y ensayar cada uno de estos materiales para realizar la elección correcta. Del mismo modo, otro aspecto importante es el almacenamiento de estos materiales, un mal almacenamiento puede provocar contaminación de estos con materias orgánicas, y esto provoca su descarte.

Tabla XVIII. **Ensayos para agregados de concreto permeable**

<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
ASTM D75 ASTM D3665	Toma de muestras
ASTM C136	Granulometría y módulo de finura
ASTM C117	Cantidad de material más fino que el tamiz 75 $\mu\text{m}$ (No. 200)
ASTM C40	Impurezas orgánicas
ASTM C88	Resistencia a la disgregación a los sulfatos
ASTM C142	Terrones de arcilla y partículas friables
ASTM C123	Material de baja densidad
ASTM C29/C29M	Densidad aparente (masa unitaria) del agregado y la escoria
ASTM C535.	Abrasión de agregado grueso
ASTM C666	Agregados reactivos
ASTM C123 ASTM C295	Partículas livianas y ensayo petrográfico.

Fuente: Comisión Guatemalteca de Normas Ministerio de Economía. p.16.

### 3.3.3.1.2. Pruebas al concreto en obra

Durante la colocación del concreto se debe examinar y ensayar cada mezcla sin excepción; por ejemplo: un concreto con mucho asentamiento puede ser causado por exceso de agua en la mezcla, lo cual disminuye la resistencia del concreto; asimismo, un concreto con muy poco asentamiento, es indicador de que el concreto no fue mezclado con las proporciones correctas o el camión mezclador ha demorado más tiempo de lo previsto en llegar a la obra; por lo cual, se debe considerar realizar ajustes y de no ser posible, el concreto debe ser rechazado.

- Muestreo: la muestra debe obtenerse verificando la tolva del camión mezclador. Dos o más porciones de concreto de la mitad de la descarga, se puede considerar una muestra representativa del contenido del camión.
- Asentamiento y contenido de aire: cuando el asentamiento y el contenido de aire medidos durante el muestreo preliminar, son menores a la especificación, se debe hacer ajustes en el sitio de trabajo con agua o aditivos desarrollados, para que se permita un mezclado adecuado.
- Densidad y rendimiento: esto se puede hacer determinando el peso del aire contenido después de que la muestra ha sido preparada.
- Temperatura: “La temperatura es medida para determinar la conformidad con los límites de temperatura en una especificación y es una prueba requisito para preparar los especímenes”<sup>28</sup> .

---

<sup>28</sup> National ready mixed. *Concrete association*. p.1.

### **3.3.3.1.3. Ensayos de laboratorio al concreto**

Las pruebas al concreto en laboratorio responden al concreto endurecido: La norma ASTM C31 describe los procedimientos para preparar los cilindros y las vigas para fallar a compresión y flexión, respectivamente. Describe los procedimientos para almacenar los especímenes en el lugar de trabajo y el transporte de ellos al laboratorio. Requiere que los especímenes de prueba se mantengan en una condición de humedad, en un rango de temperatura de 16 °C y 27 °C (60 °F y 80 °F) en el campo. Para mezclas de concreto con una resistencia especificada de 35 MPa (5000psi) o mayor, la temperatura del curado inicial, debe estar entre 20 °C y 26 °C (68 °F y 78 °F).

“Los especímenes entregados al laboratorio deben ser despojados de sus moldes, identificados y colocados en curado húmedo, tan pronto como sea posible, a más tardar 6,00 horas después según lo definido en la ASTM C31”<sup>29</sup>.

Los ensayos en el laboratorio del concreto endurecido sirven para corroborar si fue alcanzada la resistencia del concreto para el cual fue diseñado, esto mediante ensayos realizados a especímenes con forma de cilindros y dimensiones normadas. Los ensayos comúnmente se realizan a los 7, 14 y 28 días; y a los 28 días, el concreto debe alcanzar la resistencia de diseño. Igualmente, otro ensayo para determinar la resistencia del concreto es por medio de extracción de núcleos, estos son extraídos del concreto que ya fue colocado en la obra y, posteriormente, son llevados a un laboratorio para ensayarlos a compresión.

---

<sup>29</sup> National ready mixed. *concrete association*. p.2.

### 3.3.3.2. Diseño de mezcla

El concreto permeable está compuesto de cemento o una combinación de cemento y puzolana, agregado grueso y agua. Se puede incorporar una pequeña cantidad de agregado fino para aumentar la fuerza a compresión. Las graduaciones más comunes de agregado grueso utilizado en concreto permeable cumplen con los requisitos de ASTM C33 / C33M para tamaños de agregados de 7 (½ plg. A No. 4), 8 (⅜ plg. A No. 8), 67 (¾ plg. A No. 4), y 89 (⅜ plg. A No. 16).

La relación de material cementante-agua (w/cm) es una consideración importante para obtener la fuerza deseada y una estructura de vacíos en el hormigón permeable. Un alto w / cm reduce la adhesión de la pasta al agregado y hace que la pasta fluya y llene los vacíos incluso cuando está ligeramente compactado. “Un bajo w / cm evitará que se realice una buena mezcla y tenderá a provocar grumos dentro del mezclador, evita una distribución uniforme de la pasta de cemento, y por lo tanto, se reduce la resistencia y durabilidad del concreto”<sup>30</sup>

Para el concreto permeable, la relación agua-cemento es un factor importante, pues el exceso de agua en la mezcla puede disminuir considerablemente la resistencia del concreto. De la misma manera, la mezcla dejará de ser homogénea, y causará la separación de los agregados y el cemento.

---

<sup>30</sup> American concrete institute. *ACI-318*. p.12.

### **3.3.3.3. Método de carpeta de rodadura de concreto hidráulico permeable (metodología ACI 522R-06)**

“Una guía para el diseño estructural de concreto convencional para pavimentos para la construcción de parqueos se encuentra en el ACI 330R y para calles y carreteras en el ACI 325.12R. Estos documentos cubren los distintos aspectos del diseño de pavimentos”<sup>31</sup>.

No existen suficientes datos de rendimiento que ofrezcan un estándar generalizado para utilizar en el diseño de pavimento de exposición prolongada a tráfico pesado. El éxito de los pavimentos que han sido instalados alrededor del país puede variar por la experiencia del instalador, el pavimento y su diseño de mezcla, y las condiciones locales.

Las categorías de tráfico están definidas por el tráfico promedio de camiones. El ACI 330R proporciona detenidamente información sobre este tema.

“El tráfico promedio de camiones no corresponde a un único tamaño de camiones. Se asume un conjunto de camiones de distintos tamaños desde pequeños hasta grandes, con mucha frecuencia los camiones pequeños y con menor frecuencia los camiones más grandes. Los camiones más pesados deberían de tomarse como base en la selección de la categoría de tráfico en el diseño ya que dichos camiones, aún en pequeñas cantidades, son los que predominan en el daño por fatiga en el pavimento, deberían ser la base para la selección de la categoría de tráfico”<sup>32</sup>.

---

<sup>31</sup> OLAVÍ, Deenér. *Evaluación de una losa de concreto permeable vaciada in situ, para su aplicación en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de Cajamarca*. p.64.

<sup>32</sup> American concrete institute, ACI-318, p.400.

Actualmente, no existe un método estándar para el diseño de la carpeta de rodadura del concreto permeable; el ACI 522 refiere que sean utilizados los métodos del concreto tradicional. Uno de los factores más importantes para el diseño de la carpeta de rodadura es el tipo y volumen de tráfico que esta va a recibir: de acuerdo con estos datos, se calcula la resistencia y el espesor del concreto, los cuales debe poseer para funcionar adecuadamente.

#### **3.3.4. Diseño para concreto asfáltico permeable (AASHTO-93)**

El método AASHTO versión 1993 está basado en modelos que fueron desarrollados en función del desempeño del pavimento, las cargas vehiculares y resistencia de la subrasante para el cálculo de espesores. Si bien en el capítulo 1 se identificó con detalles este método, el principal propósito del modelo es el cálculo del número estructural (NS), en base al cual se identifican y determinan un conjunto de espesores de cada capa de la estructura del pavimento, mismas que deben ser construidas sobre la subrasante para cumplir con los niveles de servicio durante el periodo de diseño.

##### **3.3.4.1. Requerimientos de calidad del concreto**

La calidad del concreto asfáltico está determinada por el método Marshall, el propósito es determinar el contenido óptimo de asfalto, para una combinación específica de agregados realizando probetas de ensayo con diferentes cantidades de agregado y cemento asfáltico, siguiendo distintos ensayos para establecer sus características mecánicas y físicas.

Este método está basado en las especificaciones de las normas AASHTO T245-97 (método estándar de prueba para la resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas con la prensa de estabilidad Marshall), y ASTM

D 1559 (Diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall e interpretación de resultados).

#### **3.3.4.1.1. Ensayos al material pétreo**

Los ensayos a los agregados para mezclas asfálticas garantizan que el producto final alcance la resistencia y durabilidad deseada. Además, al realizar los ensayos, se asegura que se elijan los materiales con propiedades físicas adecuadas y se adapten al diseño de pavimento asfáltico realizado en el laboratorio. Igualmente, todos estos aspectos funcionan en conjunto para realizar un pavimento asfáltico seguro para los usuarios, y que no presente deterioro en plazos cortos al finalizar la obra.

- Abrasión. En cada banco se debe efectuar tres ensayos del material en su estado original. Durante la producción se debe efectuar un ensayo por cada 2 000 metros cúbicos de material triturado hasta alcanzar los 10 000 metros cúbicos y seguidamente uno cada 10 000 metros cúbicos o cuando cambien las características del banco.
- Caras fracturadas, partículas planas y alargadas del agregado grueso. Se debe efectuar un ensayo cada 100 metros cúbicos de los primeros 1 000 metros cúbicos producidos de cada banco y seguidamente uno por cada 5 000 metros cúbicos.
- Angularidad del agregado fino en mezclas superpave. Se debe efectuar un ensayo cada 100 metros cúbicos de los primeros 1 000 metros cúbicos producidos de cada banco y seguidamente uno por cada 5 000 metros cúbicos.

- Granulometría de los agregados. Se debe efectuar un ensayo AASHTO T 11, T 27 y T 37 por cada 200 metros cúbicos de los primeros 1 000 metros cúbicos producidos, y seguidamente un ensayo cada 400 metros cúbicos.
- Plasticidad y equivalente de arena. Se debe efectuar un ensayo cada 2 000 metros cúbicos de agregado producido.

### 3.3.4.1.2. Pruebas al material bituminoso

Es un material de color marrón oscuro a negro que puede estar en estado sólido, semisólido o líquido formado por betunes naturales u obtenidos por destilación del petróleo.

Tabla XIX. **Especificaciones para cementos asfálticos clasificados por su viscosidad a 60 °C**

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MÉTODO ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-2.5	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60°C	N s/m <sup>2</sup>	D-2170	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	3000 ± 600	4000 ± 800
Viscosidad, 135°C, mínimo	mm <sup>2</sup> /s	D-2170	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25°C, 100 g, 5 s, mínimo	1/10 mm	D-5	220	140	80	60	50	40
Punto de inflamación, Cleveland Copa Abierta, mínimo	°C	D-92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99	99	99	99	99	99
Pruebas sobre residuo del ensayo de horno sobre película delgada:		D-1754						
Viscosidad, 60°C, máx.	N s/m <sup>2</sup>	D-2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad, 25°C, 5 cm/min, mínimo	cm	D-113	100A	100	75	50	40	25

Fuente: SALAZAR DELGADO, Jorge. *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento técnico Centroamericano*. p.27.

Los grados de cemento asfáltico tienen una clasificación basada en la viscosidad del material (cuanto más fluido sea un cemento asfáltico, menos viscoso será).

“Las viscosidades se miden a temperaturas de 60° C. El grado de viscosidad se determina en el material que viene directamente del proceso de destilado y el grado de viscosidad del residuo es determinado a partir de la película fina resultante del ensayo de endurecimiento (película fina en estufa)”<sup>33</sup>.

Los ensayos a los materiales bituminosos se realizan con el objetivo de clasificarlos de acuerdo con sus propiedades, de las cuales, la más importante es la viscosidad. El material bituminoso posee como función mantener unidos los agregados en la mezcla asfáltica.

La elección de cada material bituminoso depende de la carga que recibirá el pavimento, y las condiciones del clima al cual estará expuesto durante su funcionamiento. La utilización adecuada de los materiales que componen la mezcla asfáltica garantiza la prolongación de la vida del pavimento.

#### **3.3.4.1.3. Ensayos de laboratorio al concreto asfáltico**

Los ensayos realizados al concreto asfáltico se utilizan para determinar si la mezcla asfáltica diseñada cumplirá con las necesidades que se poseen en la obra. Así, se garantiza que la mezcla posea la resistencia deseada para soportar las cargas de tráfico. Asimismo, se determina si la mezcla es convenientemente

---

<sup>33</sup> Escuela de Caminos de Montaña de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan. *Ensayos en caliente a mezclas bituminosas*. p.16.

uniforme y la resistencia a la deformación, la cual es provocada por las cargas del tráfico y las condiciones climáticas a las cuales está expuesta.

- Ensayo Marshall: fue desarrollado por el US Corps of Engineers. Las dimensiones de la muestra son 4 " (10 cm) de diámetro por 2,5 " (6,3 cm) de altura. Sobre esta muestra se hace un análisis de densidad-vacíos y estabilidad-flujo.
- Ensayo Hveem: las dimensiones de la muestra son las mismas. Se usa una célula triaxial especial para medir la resistencia de la mezcla al desplazamiento lateral bajo cargas verticales a 60 ton.
- Módulo resiliente diametral: es un ensayo de carga repetitiva hecho en probetas cilíndricas (forma Marshall). La distribución de tensiones y deformaciones específicas dentro de la probeta es la misma que la desarrollada en el ensayo de tracción indirecta.
- Módulo dinámico de rigidez: es obtenido mediante ensayos dinámicos cíclicos de flexión. La carga aplicada es pulsante con una duración de 0,10 seg. y un período de reposo de 0,40 seg.
- Resistencia a la tracción indirecta: se determina en las probetas Marshall (4 plg x 2,5 plg o 10 cm x 6,3 cm) de la misma forma que para probetas de hormigón. La carga es aplicada a una velocidad de 51,00 mm/min a una temperatura estándar de 22 °C.

### 3.3.4.2. Diseño de mezcla asfáltica

El diseño de mezcla asfáltica se realiza de acuerdo a ciertos parámetros, como las condiciones en las cuales se va a trabajar, las propiedades de los agregados pétreos, dosificación de asfalto ligante, la estructura del pavimento, las exigencias de seguridad vial, técnicas de construcción, topografía del terreno donde se construirá el pavimento, condiciones de temperatura a las que estará expuesto el pavimento, el tipo de tráfico para el cual brindará servicio y las condiciones de lluvia de la región.

- Método de diseño Marshall: el método original de Marshall solo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1,00 plg) o menor.
- El método modificado se desarrolló para tamaños máximo arriba de 38,00 mm (1,5 plg). Está pensado para diseño en laboratorio y control de campo de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.
- Métodos de diseño Superpave: iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (*Superior performing asphalt pavement*). "Representa una tecnología de tal manera provista que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral, desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del

pavimento. Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado petreos y asfaltos)”<sup>34</sup>.

### 3.3.4.3. Método de diseño para la carpeta de rodadura de concreto asfáltico permeable (AASHTO-93 modificada)

La AASTHO presenta un manual que determina el proceso de diseño de la estructura de un pavimento para el que se debe tener en cuenta:

- La confiabilidad
- Módulos resiliente de los materiales
- Coeficientes de drenaje
- Efecto de subrasantes expansivas o sometidas a congelación y deshielo.

En 1993 fue hecha una versión revisada de esta guía, cuyos principios para el diseño de pavimentos flexibles se fecha. De acuerdo con la metodología establecida en esta guía, se debe considerar la siguiente ecuación para el diseño:

$$\text{Log}W_{18} = Z_R \cdot S_o + 9,36 \cdot \text{Log}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\text{Log} \frac{(\Delta PSI)}{4,2 - 1,5}}{0,40 + \frac{1\ 094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \text{Log}M_R - 8,07$$

Donde:

$W_{18}$  = Tráfico equivalente o ESAL

$Z_R$  = Factor de desviación normal para un nivel de confiabilidad R

---

<sup>34</sup> GARNICA, Paul, DELGADO, Horacio; SANDOVAL, Carlos. *Análisis comparativo de los métodos marshall y superpave para compactación de mezclas asfálticas*. p.3.

$S_o$	=	Desviación estándar
$\Delta PSI$	=	Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final deseado
$M_R$	=	Módulo de resiliencia efectivo de la subrasante
$SN$	=	Número estructural

En la sección 1.2.3.2 se detalla cada uno de los pasos para encontrar el espesor de cada una de las capas que conforman el concreto permeable, ya que utiliza la misma metodología que un pavimento convencional.

El diseño de la carpeta de rodadura con mezcla asfáltica depende de los parámetros a los cuales estará sometido durante su funcionamiento. El espesor de la carpeta se determina por la carga de tráfico que recibirá, también depende de las propiedades físicas de los agregados, las propiedades físicas y químicas del material bituminoso y las condiciones climáticas a las cuales estará expuesto.

Además, para carpetas de mezcla asfáltica permeable se utiliza una mezcla con agregados gruesos de mayor tamaño y al limitar los agregados finos, con el objetivo de crear vacíos dentro de la estructura, y de esta forma facilitar la filtración de la escorrentía hacia el suelo.

### **3.4. Diseño hidráulico**

Para el óptimo desempeño de un concreto permeable no solo basta con la apropiada selección de los agregados pétreos y la mezcla bituminosa, sino también se debe tener en consideración las condiciones del entorno donde se pondrá en funcionamiento, como la cantidad de agua a drenar y la capacidad de filtración del suelo.

Los datos históricos de precipitaciones en la región donde se implementará un concreto permeable es de suma importancia, pues son base para el diseño del volumen a filtrar y periodo de diseño de dicha estructura.

#### **3.4.1. Reservorio**

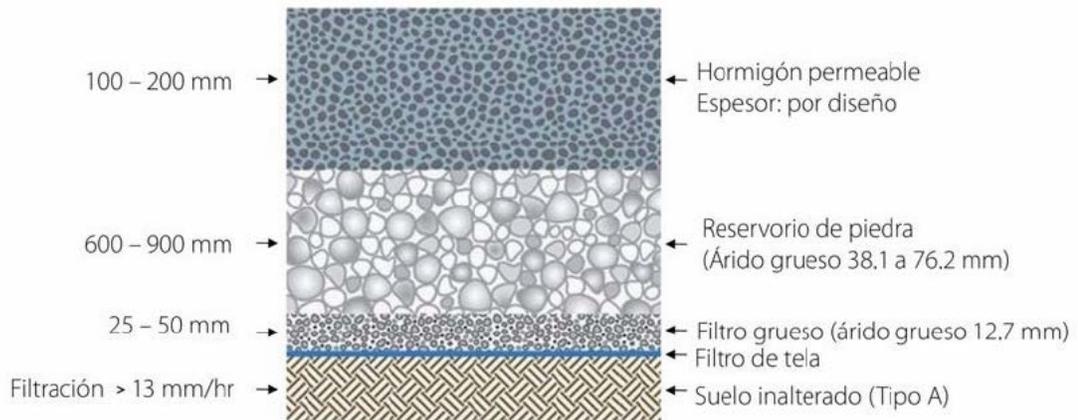
Un concreto permeable se conforma por una capa de rodadura (de concreto poroso), un reservorio de piedra, un filtro grueso, un filtro de tela o geosintético y el suelo inalterado. En el diseño hidráulico, los factores de importancia son el volumen de precipitación que se espera y la velocidad de infiltración del suelo. Se debe seleccionar un evento de lluvia característica de la zona, así como su duración y período de retorno. “En general, se considera un período de retorno de 25 años. Sin embargo, el factor determinante en el diseño hidráulico es la capa de infiltración del suelo los que condiciona la cantidad de escurrimiento superficial resultante”<sup>35</sup>.

El reservorio es una capa granular que forma parte de la estructura del pavimento, esta se localiza bajo la carpeta de rodadura, en la cual se almacena el agua proveniente de la escorrentía superficial o precipitación, filtrada por el pavimento permeable y, posteriormente es filtrada hacia el suelo o recolectada por medio de tubería de drenajes. El reservorio debe estar compuesto por agregado grueso de tamaño considerable para permitir el paso del agua y, al mismo tiempo, cumplir con los requerimientos de la carga de diseño.

---

<sup>35</sup> UNTIVEROS, Carlos Aire. *Experiencias concretas. Tecnología para El Concreto*. p.61.

Figura 23. **Sección típica de un sistema de pavimento concreto poroso**



Fuente: UNTIVEROS, Carlos Aire. *Tecnologías para el concreto*. p. 3.

### 3.4.2. Volumen de afluente

Se recomienda determinar el volumen a infiltrar acumulado para una lluvia de período de retorno de  $T$  años como el generado por las intensidades medias, de acuerdo a la curva IDF correspondiente. Es decir, el volumen acumulado de agua lluvia,  $V_{afl}(d)$ , en metros cúbicos, para un tiempo  $t$ , en horas, se calcula como:

$$V_{afl}(d) = 1,25(0,001C \cdot I_d A d) = 0,0125C \cdot A \cdot P_d^T$$

Donde:

$C$  = Coeficiente de escorrentía superficial correspondiente al área total aportante

$A$  = Área total aportante (metros cuadrados)

$I_d$  = Intensidad de la lluvia de período de retorno  $T$  y duración  $d$  (mm/h)

$d$ = Tiempo acumulado de lluvia (horas)

$P_d^T$ = Precipitación acumulada en el tiempo  $d$  para la lluvia de periodo de retorno de  $T$  años

Además, el producto de la intensidad por el tiempo corresponde a la precipitación total acumulada en  $d$  horas para el periodo de retorno  $T$ , esto es  $P_d^T$ , en mm. El valor de  $V_{afl}(d)$  en función de  $d$  se denomina “curva de recarga”. “Se recomienda multiplicar por un factor de seguridad de 1,25 el volumen acumulado para considerar la porción de lluvia que cae antes y después de la porción más intensa de la tormenta, no incluida en las curvas IDF”<sup>36</sup>.

El volumen de afluente se calcula con el objetivo de conocer la cantidad de agua máxima a la cual puede estar expuesta la obra; por ende, es la cantidad de agua la cual va a ser filtrada. El cálculo de este valor es de suma importancia para conocer qué se espera, para poder realizar los diseños adecuados de drenajes, realizar la elección correcta de los elementos filtrantes y conocer si el suelo es lo suficientemente permeable para filtrar el volumen del afluente en un período deseado.

### 3.4.3. Volumen de almacenamiento

Para el cálculo de volumen de almacenamiento  $V_{alm}$  necesario del pavimento poroso se estima el volumen acumulado que puede ser drenado con la tasa de infiltración estimada en función del tiempo. Se puede determinar gráficamente como la máxima diferencia entre el volumen afluente acumulado de

---

<sup>36</sup> POLANCO ANDRADE, Ángela María; SANCHEZ VEGA, Ángela María. *Diseño hidráulico de losas en pavimento poroso rígido como estructuras complementarias al drenaje pluvial de Bogotá*. p.24.

agua lluvia o volumen de  $V_{afl}(d)$  y el volumen acumulado infiltrado  $V_{inf}(d)$ , ambos en función del tiempo, este último, en metros cúbicos, está dado por:

$$V_{inf}(d) = 0,001(f \cdot C_s \cdot A_{pav} \cdot d)$$

Donde:

$f$ = Capacidad de infiltración del suelo (mm/h)

$A_{pav}$ = Área del pavimento poroso (m<sup>2</sup>)

$d$ = Tiempo acumulado de lluvia (h)

$C_s$ = Coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de infiltración dependiendo de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento que toma en cuenta los efectos de la colmatación en el tiempo que experimenta el suelo.

El volumen de almacenamiento necesario se calcula como:

$$V_{alm} = \max(V_{afl}(d) - V_{inf}(d))$$

“Si la tasa de infiltración del terreno es siempre mayor que la intensidad de la lluvia, incluso que la de menor duración, entonces no se requiere un volumen de acumulación en la subbase, sino que bastará con la superficie de contacto con la subrasante para la infiltración”<sup>37</sup>.

De la misma manera, por medio del cálculo del volumen de almacenamiento se determina las características de la subbase, necesario para almacenar el volumen de agua que recibirá. Del mismo modo, dentro de esas características

---

<sup>37</sup> AÑAZCO, Jorge. *Trincheras de retención/infiltración utilizadas como sistemas alternativos al drenaje urbano*. p.200.

se encuentra el espesor de la subbase y el tipo de agregado del cual estará compuesta. El espesor debe poseer las dimensiones adecuadas para poder retener el agua hasta que esta pueda ser filtrada por el suelo o transportada por medio de drenajes.

#### **3.4.4. Metodologías de diseño hidrológico**

Se deberá analizar la presencia, el uso, las fluctuaciones estacionales, la cota más alta de las napas subterráneas y, eventualmente, sus características cualitativas y su vulnerabilidad. Se determinará el gasto máximo admisible de evacuación del proyecto, en base a las capacidades de la red aguas abajo o a la permeabilidad del suelo. Además, es necesario conocer la pluviometría, la posición y características de la salida, las zonas potenciales de almacenamiento y la impermeabilización de las superficies relacionadas con el pavimento.

“Se recomienda dimensionar el volumen de almacenamiento de la subbase seleccionando una lluvia de diseño del mayor periodo de retorno entre los siguientes:  $T=5$  años, si hacia aguas abajo existe una red de drenaje bien desarrollada.  $T=10$  años, si no existe una red de drenaje bien desarrollada”<sup>38</sup>

También es importante realizar correctamente los estudios hidrológicos para el diseño de carreteras sin importar cuál sea el tipo, pues estos son parámetros los cuales se utilizan para calcular las dimensiones de los elementos que componen la estructura del pavimento, así como las obras de drenajes. Igualmente, con los estudios hidrológicos se determinan las cantidades, las dimensiones y los tipos de drenajes, los cuales se deben realizar para salvaguardar las obras.

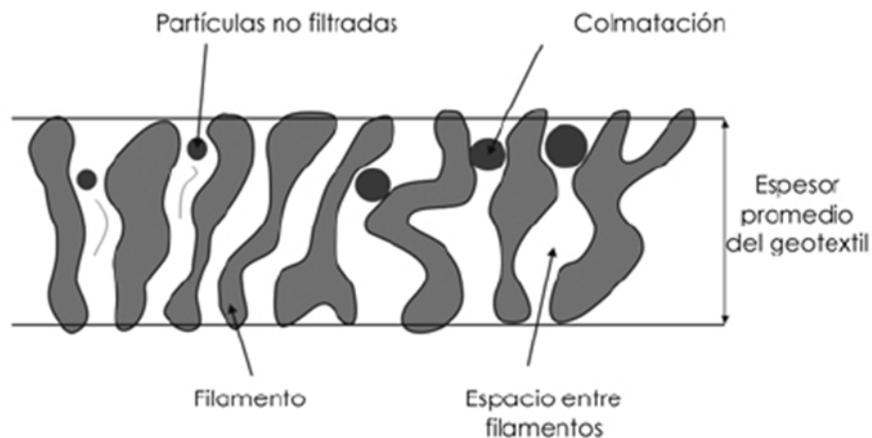
---

<sup>38</sup> AÑAZCO, Jorge. *Trincheras de retención/infiltración utilizadas como sistemas alternativos al drenaje urbano*. p.76.

### 3.5. Colmatación

Por definición, la colmatación resulta cuando partículas finas del suelo penetran dentro del geotextil, bloqueando sus canales de poros o cuando son depositadas del lado aguas arriba del geotextil y producen una reducción significativa de la permeabilidad. Por lo tanto, el geotextil debe tener un porcentaje mínimo de espacios vacíos. En aplicaciones críticas o en proyectos que involucren suelos muy finos se recomienda realizar ensayos de colmatación con los suelos del sitio, la norma que describe este ensayo es la ASTM 5101-90.

Figura 24. **Colmatación del filtro por penetración de partículas**



Fuente: Geosistemas Pavco. *Manual de diseño con geosintéticos*. p. 1.

La colmatación es la obstrucción del material filtrante por partículas finas que disminuyen fuertemente la filtración, a gran escala. Esto puede ser causa de exceso de agua en un pavimento, el cual podría deteriorarse. Igualmente, por lo regular, la colmatación ocurre en los geotextiles tejidos los cuales poseen baja porosidad, por lo cual no se recomienda el uso de estos en sistemas de drenajes. Asimismo, los geotextiles no tejidos, los cuales son unidos por calentamiento,

presentan una mayor resistencia a la colmatación debido a sus altos valores de porosidad.

## **4. MEZCLA ASFÁLTICA PARA PAVIMENTOS PERMEABLES TOPMIX**

### **4.1. Descripción de la mezcla asfáltica Topmix**

Topmix permeable es un concreto que ofrece propiedades de permeabilidad mejoradas sobre soluciones tradicionales. Topmix simplifica el proceso de construcción y reduce los costos.

Un sistema típico consiste en una capa de Topmix permeable instalada en la superficie de un agregado de subbase, el cual se encuentra asentado sobre suelo fresco o en la capa que cubre la superficie. La estructura y las dimensiones de cada capa dependen de la aplicación y del sistema de diseño.

A diferencia de los concretos permeables convencionales, este tiene un alto contenido de vacíos, entre 20 % a 35 %. Esto permite que el agua en la superficie drene hacia el sustrato y se disipe naturalmente, reduciendo el riesgo de inundaciones o contaminación del agua.

Topmix es un producto fabricado en Inglaterra por la empresa TARMAC. Es un concreto asfáltico con alto contenido de vacíos, lo cual le brinda su principal característica, filtrar grandes cantidades de agua por el suelo, o bien que sea recolectada por tuberías de drenajes instaladas bajo la estructura del concreto, al generar carreteras más seguras y evitar acumulación de agua en la superficie.

La mezcla Topmix permeable puede desempeñar un papel fundamental en la mayoría de sistemas de drenaje urbano sostenibles (SUDS), la respuesta a

largo plazo para inundaciones de agua de superficie que puede ser implementado rápidamente y rentablemente.

El uso de Topmix en las ciudades puede ser una solución eficiente, debido a que en los lugares con mayor afluencia de personas es un problema grave los frecuentes bloqueos en las tuberías de drenaje, pues la contaminación es mayor y los drenajes no son lo suficientemente capaces de evacuar toda el agua de forma rápida y eficiente de las fuertes lluvias; por lo cual ayudaría de gran manera a filtrar la escorrentía y de esa forma evitar inundaciones.

El pavimento de concreto Topmix es también llamando concreto poroso, permeable, no fino, poroso y absorbente. Es un tipo especial de concreto con una alta porosidad utilizado para aplicaciones de estructuras planas de hormigón. Consiste en una estructura permeable con poros interconectados a través de los cuales el agua de lluvia es infiltrada hacia un acuífero. Este consiste de cemento, agregados gruesos, ceniza y agua. Si el agregado es angular, los poros en el agregado aumentarán.

Sin embargo, no existe un estudio sistemático de los efectos de angularidad en el agregado en los poros del concreto. El pavimento de concreto Topmix es tradicionalmente utilizado en áreas de parqueo, áreas con tráfico liviano, calles residenciales, aceras y viveros. Es un material amigable al ambiente y la Agencia de Protección Ambiental EPA lo ha reconocido como la Mejor Práctica de Manejo (BMP) por el tratamiento de aguas de lluvia y tormenta.

Este pavimento obtiene su característica filtrante gracias a los agregados gruesos, los cuales componen la mezcla, y este carece de agregados finos debido a que la presencia de estos, provocaría que los vacíos se llenen, al disminuir la capacidad de filtrar las escorrentías. Así, mientras más angularidad

posean los agregados gruesos, mayor será el tamaño de los vacíos y la filtración será más eficiente. La angularidad de agregado grueso se obtiene mediante el proceso de trituración.

## **4.2. Propiedades del material asfáltico**

Los pavimentos de concreto Topmix cuentan con la característica de absorber menos calor que los pavimentos tradicionales, debido a la gran cantidad de vacíos con los cuales está compuesta la estructura del concreto, al ser menos densa que los pavimentos tradicionales de asfalto y concreto. Igualmente, en las áreas urbanas, esta característica ayuda a disminuir el calor, y generar al pavimento Topmix como una excelente solución amigable con el medio ambiente.

### **4.2.1. Propiedades físicas y químicas**

Cuando la temperatura del concreto aumenta, la velocidad de reacción entre el cemento y el agua aumenta y esto, a su vez, conduce a un aumento de la tasa de rigidez y pérdida de consistencia. También hay un mayor riesgo de tener problemas de agrietamiento a temprana edad porque la temperatura máxima aumentará. El estándar británico (BS 8500-2: 5.4) requiere que la temperatura del concreto fresco en el momento de la entrega no será mayor que:

- El valor especificado (donde se especifique)
- 35 °C (en todas las áreas)<sup>39</sup>.

Además, es indispensable realizar ensayos de temperatura a la mezcla de concreto Topmix fresco antes de su colocación, con el objetivo de verificar que la mezcla no sobrepase la temperatura recomendada por el fabricante, para evitar

---

<sup>39</sup> TARMAC. *Technical information Topmix permeable*. p.1

pérdida en la resistencia y presencia de grietas en las superficies, pues repercutiría en reparaciones y aumento de costos. De la misma manera, la colocación de la mezcla debe realizarse a temperatura recomendada para su optimización y se pueda realizar un correcto acabado en la superficie del pavimento:

Debe tenerse en cuenta dos temperaturas al trabajar con hormigón en climas fríos, el del aire ambiente temperatura y la temperatura del hormigón.

Si el concreto recién colocado se enfría por debajo de 0 °C, el agua en el concreto se congelará y expandirá. Esto causa daño y microgrietas en el concreto inmaduro, haciendo es débil e inadecuado para el propósito y tendría que ser removido.

Sin embargo, siempre que se permita que el hormigón llegue primero a una resistencia máxima de aproximadamente 2 N/mm<sup>2</sup> puede en gran medida resistir tal expansión disruptiva. “Para la mayoría de las mezclas de hormigón esta resistencia se logra dentro de las primeras 48 horas, si la temperatura del concreto se mantiene a 5 °C o más. Sin embargo, incluso después de que el concreto haya alcanzado una resistencia de 2 N/mm<sup>2</sup> la baja temperatura disminuirá el desarrollo de la resistencia”<sup>40</sup>.

Del mismo modo, no es recomendable utilizar el concreto Topmix en regiones con temperaturas que alcancen los 0 °C, pues el agua, la cual se encuentra filtrada en la superficie de concreto, puede llegar a su estado de congelación y expandirse, lo cual provocaría que se desplazaran los agregados, los cuales componen la mezcla, al producir fisuras en el pavimento, y al generar

---

<sup>40</sup> TARMAC. *Technical information Topmix permeable*. p.1

que la resistencia disminuya, lo cual representa incurrir en reparaciones y un aumento en el costo de la obra.

Figura 25. **Colores disponibles para el Topmix**



Fuente: TARMAC. *Topmix permeable brochure*. p.11.

El fabricante de Topmix ofrece cuatro colores para las mezclas asfálticas como se muestran en la figura 25, lo cual genera que este producto sea versátil, pues puede ser utilizado en parques, parqueos, banquetas o lugares de mucha afluencia de personas, al lograr que los proyectos sean más atractivos y comerciales, incluso este pavimento puede ser utilizado en proyectos residenciales, al brindar una apariencia agradable para los usuarios.

Materiales como el asfalto y el concreto tradicional contribuyen al efecto UHI, donde las áreas urbanas son significativamente más cálidas que las áreas rurales circundantes. Debido a los huecos dentro de su estructura, Topmix permeable es menos denso que el concreto convencional y, por lo tanto, tiene una capacidad reducida de almacenamiento de calor. Además, los vacíos permiten que el agua almacenada se evapore en climas más cálidos creando un efecto de enfriamiento. El efecto UHI es un factor de reflectancia solar o albedo, y es el porcentaje de energía solar reflejada por una superficie. “Típicamente, esto es entre 35 % y 40 % para concreto, que es mayor que el asfalto oscuro (entre 5 % y 10 %). Cuanto mayor sea la reflectancia, menor será la energía absorbida y menor será la contribución al efecto UHI”<sup>41</sup>.

#### **4.2.2. Propiedades mecánicas e ingenieriles**

- Capacidad de drenaje: 150 a 1 000 litros por minuto por metro cuadrado
- Contenido de vacío: 20 % a 35 %
- Resistencia a compresión: 10 a 20 N/mm<sup>2</sup>
- Resistencia a flexión: 1,5 a 3 N/mm<sup>2</sup>
- Acabado final: 6 mm de mezcla
- Estabilización de suelo debajo de bloques: 10 mm de mezcla.

El pavimento de concreto Topmix cuenta con la propiedad de drenar grandes cantidades de agua provenientes de precipitaciones ayudando evitar el colapso de drenajes en las áreas urbanas, esta propiedad del concreto se obtiene por la cantidad elevada de vacíos que facilitan la filtración de la escorrentía. La resistencia a compresión y flexión con la que cuenta el pavimento de concreto

---

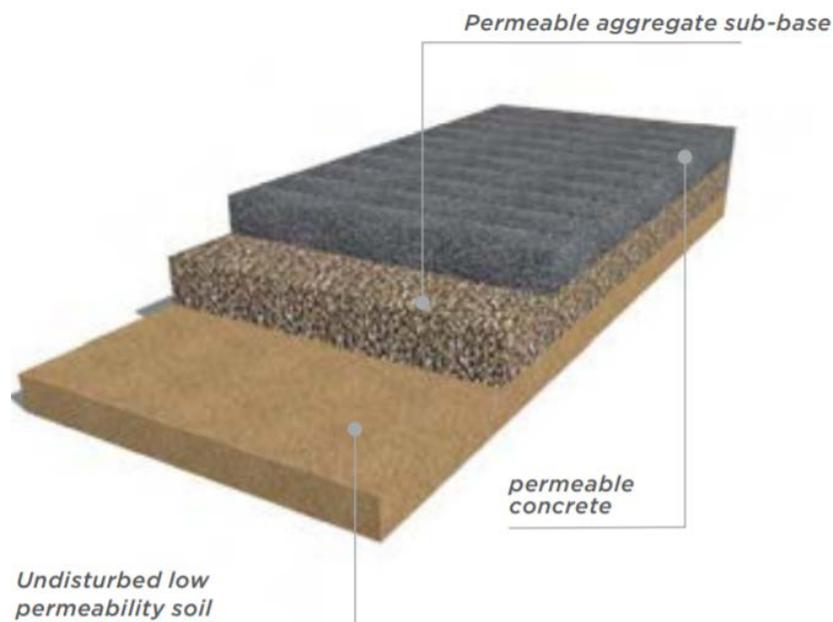
<sup>41</sup> TARMAC. *Technical information Topmix permeable*. p.3.

Topmix sugiere que este no sea utilizado en lugares donde exista tráfico pesado ni donde la velocidad de los automóviles supere los 50 km/h.

- Sistema A. Filtración completa.

Este sistema permite que caiga toda el agua en el pavimento para penetrar la capa superficial del Topmix permeable, pasar a través del interior del pavimento hacia la subrasante. Un poco de agua puede ser retenido dentro del depósito del pavimento antes de penetrar en la subrasante. El sistema de infiltración completa no descarga agua adicional en sistemas tradicionales de drenajes. Se pueden incorporar geotextiles en el sistema dependiendo de la naturaleza de la subrasante.

Figura 26. **Sistema A. Filtración completa**



Fuente: TARMAC. *Permeable concrete solution guide*. p.13.

Asimismo, este sistema de infiltración completa puede ser ejecutado en áreas en las cuales la permeabilidad del suelo es alta y posea una eficiente velocidad de filtración, ya que un suelo poco permeable puede llegar a saturarse con grandes cantidades de agua y en poco tiempo provocando inundaciones. El sistema de infiltración completa favorece a la recarga del manto freático y de esa manera se garantiza la pureza de las aguas superficiales y subterráneas.

- Sistema B. Filtración parcial.

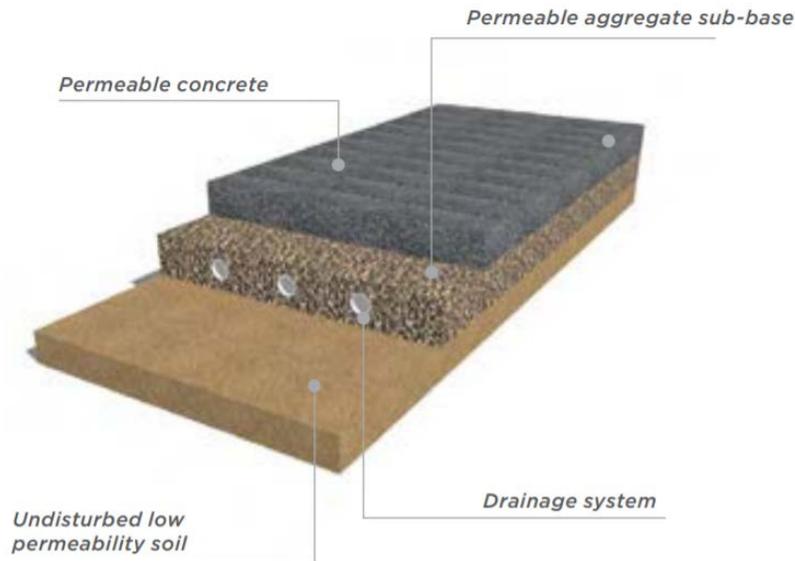
Este sistema es viable para ubicaciones donde el terreno subyacente ofrece cierto nivel de permeabilidad y la infiltración es aceptable. Dentro de la capa de subbase son instalados tubos de salida que permiten que cualquier exceso de agua que no pueda filtrado en el suelo pueda ser drenado a otros dispositivos de drenaje tales como canales o alcantarillas. “Este sistema se usa típicamente donde el subrasante no es capaz de drenar todo del agua como un medio para reducir el volumen de escorrentía del sitio. Geotextiles puede incorporarse al sistema dependiendo de la naturaleza del proyecto”<sup>42</sup>.

Además, cuando el suelo no posee la suficiente velocidad de infiltración ni alta capacidad de filtrar el agua proveniente de precipitaciones, Topmix puede ser construido con una configuración en la cual se instalan tuberías dentro de la capa granular que funciona como subbase, estas tuberías constan de perforaciones en la superficie por donde el agua ingresa a la tubería y esta permite que se pueda drenar el agua que el suelo no fue capaz de filtrar.

---

<sup>42</sup> TARMAC. *Permeable concrete, solution guide*. p.7.

Figura 27. **Sistema B. Filtración parcial**



Fuente: TARMAC. *Permeable concrete solution guide*. p.14.

- Sistema C. Atenuación completa.

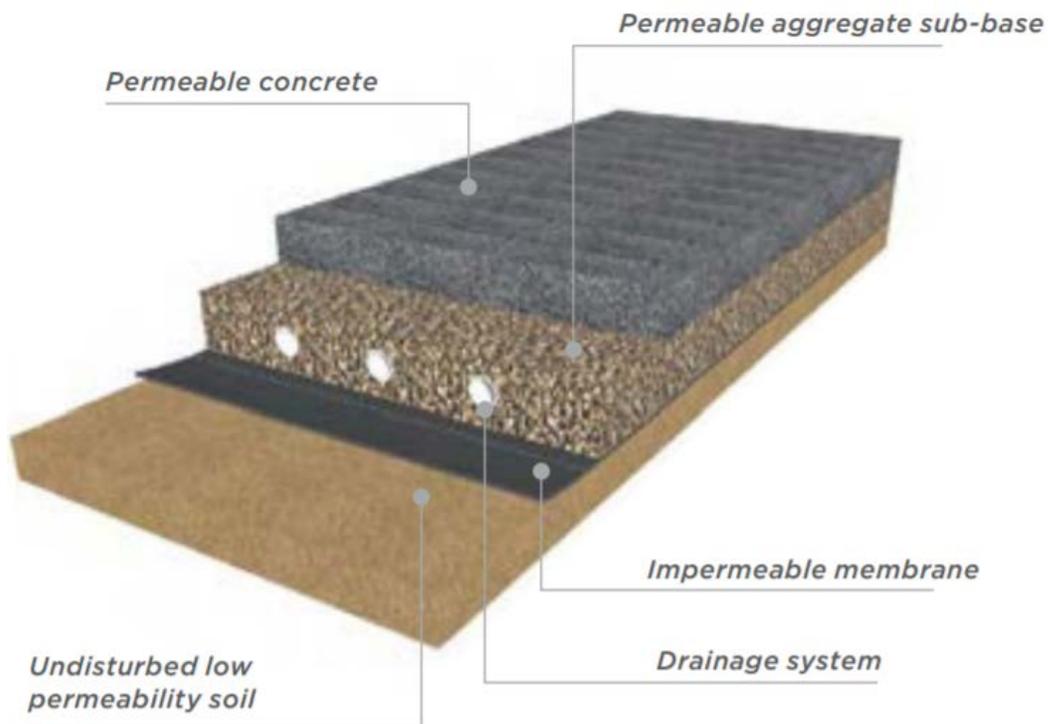
El uso de este sistema generalmente se adopta donde se desea reciclar agua, en áreas donde el agua puede estar contaminada, o donde la subrasante es impermeable o se debilita cuando está saturado. El sistema incluye la instalación de una membrana impermeable sobre la subrasante y provisión de tuberías de salida dentro de la capa de subbase. “El sistema de atenuación completa permite que el agua sea capturada y cosechada para su reutilización en aplicaciones no potables como riego o sanitarios. Geotextiles puede incorporarse al sistema dependiendo de la naturaleza del proyecto”<sup>43</sup>.

---

<sup>43</sup> TARMAC. *Permeable concrete, solution guide* p.7.

De la misma manera, es recomendable utilizar este sistema en regiones donde los suelos son no permeables como la arcilla. Del mismo modo, esta configuración de estructura del pavimento Topmix no permite que el agua sea filtrada por la subrasante mediante la instalación de un geotextil impermeable entre la subrasante y la subbase y un sistema de tuberías perforadas en la superficie, colocado en el interior de la subbase; con el objetivo de transportar toda el agua hacia reservorios donde posteriormente el agua recaudada pueda ser reutilizada.

Figura 28. **Sistema C. Atenuación completa**



Fuente: TARMAC. *Permeable concrete solution guide*. p. 14.

### **4.3. Usos típicos propuestos**

El fabricante de Topmix recomienda el uso de este pavimento en lugares de donde se presente baja carga vehicular o donde no transite transporte pesado, debido a la baja resistencia a flexión y compresión, comparado con los concretos tradicionales, esta baja resistencia es provocada por la gran cantidad de vacíos con los que cuenta la estructura del concreto, por ende, se recomienda el uso de Topmix en sitios donde pueda ser aprovechada al máximo su propiedad de filtración. Alguno de los usos más recomendados por el fabricante es:

- Carreteras residenciales de bajo volumen y estacionamientos
- Pavimentos, senderos para bicicletas y peatones
- Patios
- Canchas de tenis
- Hombros de carreteras
- Cubiertas de piscinas
- Callejones
- Calzadas
- Pisos de invernadero
- Desagües y cunetas en los bordes del pavimento
- Superficies duras para instalaciones deportivas
- Debajo de bloques permeables para estabilización del suelo.



## **5. ANÁLISIS COMPARATIVO**

### **5.1. Descripción específica del lugar en análisis**

El área del proyecto, denominado Progreso VII Deriva, propiedad de Exploraciones Mineras de Guatemala S.A. se encuentra asentada dentro del cinturón regional mineralizado denominado Tambor. En esta zona se han identificado áreas de interés minero, específicamente de minerales de oro.

Progreso VII Derivada obtiene su licencia de explotación en el año 2010, es publicada en los diarios nacionales oficiales para un periodo de 25 años prorrogables en el área. Dentro de los planes de gestión ambiental y la minimización de impacto ambiental a la región, surge la propuesta de esta investigación para dar una herramienta viable y a la vez funcional para el desarrollo de toda la infraestructura necesaria para el funcionamiento de dicho proyecto.

Para la extracción se utilizará flotación, un método comúnmente utilizado para el aprovechamiento de minerales de oro que presentan las condiciones geológicas similares a las del proyecto. El método de minado es combinado, es decir, subterráneo y a cielo abierto.

Se han diseñado planes de gestión ambiental específicos para el proyecto. Su implementación tiene como finalidad prevenir, minimizar, mitigar, reducir y/o compensar los impactos ambientales adversos y potencializar los impactos ambientales benéficos. Dentro de los planes diseñados se encuentran: Plan de monitoreo ambiental, plan de seguridad industrial, plan de reforestación, plan de

minado, plan de manejo de sustancias químicas, programa social, plan de cierre, entre otros.

Considerando las características del proyecto, se requiere del desarrollo de infraestructura que incluye: planta de proceso, oficinas, laboratorio, depósitos superficiales de material estéril y suelo fértil, pila de colas, sistemas de drenaje de aguas pluviales y servidas, subestación eléctrica, pozo mecánico de agua, campamento, entre otras. Este último es donde se basará el desarrollo de la presente investigación.

Figura 29. **Área de intervención del proyecto minero Progreso VII Derivada**



Fuente: Google maps. *Proyecto Progreso VII Derivada, San José del Golfo, Guatemala.*  
<https://www.google.com.gt/maps/place/San+Jos%C3%A9+del+Golfo/@14.7762056,90.3875045,957m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x858993e33c111a77:0x2a80337ae1299bcf!8m2!3d14.7644356!4d-90.3715304?hl=es>. Consulta: 25 de febrero de 2021.

Los objetivos primordiales para la minimización del impacto ambiental en la zona acordados en el EIA aprobado es la implementación de tecnologías amigables con el medio ambiente, afectando en poco o nada el entorno natural en la región.

Con el fin de proponer soluciones viales y de bajo impacto ambiental se plantea con esta investigación la implantación futura de un nuevo pavimento denominado Topmix, producto de la empresa británica TARMAC. Ofrece una velocidad de drenaje de entre 150 y 1 000 L/min/m<sup>2</sup>, siendo valores superiores a los de las demás mezclas asfálticas permeables e incluso a los pavimentos de mezclas de concreto hidráulico. Brinda un alto grado de resistencia a la fricción, lo que lo hace realmente bueno para parqueos, encaminamientos, vías urbanas y hasta para subbase de carpeta asfáltica. El agua que entra en contacto con este concreto se almacena bajo dicha capa (Volumen de almacenamiento) hasta que comienza a evaporarse, ayudando así a mantener el agua en reposo para propiciar así también la infiltración.

### **5.1.1. Ubicación geográfica**

El proyecto de explotación minera Progreso VII Derivada se ubica entre los municipios de San Pedro Ayampuc y San José del Golfo, ambos del departamento de Guatemala, aproximadamente a 28,00 kilómetros del centro de la ciudad. Las coordenadas centrales del área del proyecto son 781 320 E, 1 635 390 N, coordenadas UTM, NAD 83, zona 15.

El desarrollo de este trabajo consiste en la propuesta para la construcción de parqueos encaminamientos y canchas recreativas, todas en el área denominada “Campamento”, cuyas coordenadas son 781 118 E, 1 634 909 N y 885 msnm. El área total es un total de 7 736 m<sup>2</sup> de superficie, todos destinados

para áreas de recreación de los trabajadores de dicha empresa, como se puede apreciar en la figura 30.

Figura 30. **Área destinada a la construcción denominada Campamento**



Fuente: Google maps. *Área de interés, Progreso VII Derivada, San José del Golfo, Guatemala.*  
<https://www.google.com.gt/maps/place/San+Jos%C3%A9+del+Golfo/@14.7726682,-90.3896752,667m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x858993e33c111a77:0x2a80337ae1299bcf!8m2!3d14.7644356!4d-90.3715304?hl=es>. Consulta: 25 de febrero de 2021.

### **5.1.2. Consideraciones de lluvia**

El período en que las lluvias son más frecuentes corresponde a los meses de mayo a noviembre, variando en intensidad según la situación orográfica que ocupan las áreas de la zona. “La precipitación oscila entre los 1 100 y 1 349 mm, la biotemperatura oscila entre los 20 °C y 26 °C. La relación de

evapotranspiración potencial es de alrededor de 1,00, es decir que la evapotranspiración potencial es similar a la precipitación pluvial en el área<sup>44</sup>

En la tabla XX podemos encontrar algunas de las variables meteorológicas de la región, datos tomados por la estación del INSIVUMEH ubicada en el municipio de San Pedro Ayampuc, del departamento de Guatemala.

**Tabla XX. Variables meteorológicas del proyecto Progreso VII Derivada para el año 2009**

Variable	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Temperatura (Celsius)	20.8	21.7	23.1	24.1	24.3	23.4	22.7	23	22.6	21.9	21	20.1	22.5
Precipitación (mm)	4	1.9	4.5	69.5	112.7	215.1	147.3	135.4	260.3	156.3	35.4	21.8	1164.3
Humedad Relativa (%)	72.7	66.9	64.9	67.4	69.4	76	79.3	78.2	81	81.4	80	78.4	73.1
Días lluvia	2.9	1.8	2	6.5	9.6	18.1	17.1	12	18.7	13.2	6.9	5	113.7
Temperatura (Farenheith)	69.4	71.1	73.6	75.4	75.7	74.1	72.8	73.3	72.6	71.5	69.7	68.3	72.6
Radiación Solar diaria (horas)	12	13.3	14.7	15.6	16	15.9	15.9	15.7	15	13.9	12.4	11.6	
Brillo solar S (%)	11.3	11.6	12	12.5	12.8	13	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2	
Radiación Solar (Incidente mensual)	90.8	101.9	114.6	124.1	128.8	129	128.5	125.4	117.9	107.4	94.2	87.3	
Evapotranspiración (mm)	47.3	54.4	63.2	70.2	73.2	71.7	70.1	69	64.2	57.6	49.3	44.7	734.7
Exceso (mm)					39.5	143.4	77.2	66.5	196.1	98.7			621.4
Deficit (mm)	43.2	52.5	58.7	0.7							13.9	22.9	191.9

Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.154.

<sup>44</sup> EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p.152.

### **5.1.3. Capacidad de infiltración**

La capacidad de infiltración es la velocidad máxima con que el agua penetra en el suelo, depende de muchos factores como: tipo de suelo, cantidad de precipitación, humedad relativa del inicial del suelo, porcentaje de vacíos de la masa del suelo, entre otros. Los métodos para obtenerlo varían dependiendo de la aplicación que se le vayan a dar a los mismos.

Para nuestro caso utilizaremos el modelo del centro ingeniería sanitaria Robert A. Taft, también llamado infiltración estándar, este método es el utilizado para el diseño de pozos de absorción. Lo que se pretende es que toda la estructura de pavimento propuesta sirva de área de libre circulación de la precipitación dejando paso libre al agua, sin interrumpir el ciclo natural del agua y que la subrasante en totalidad funcione, así como un campo de infiltración. A continuación se detallará las variantes y el método para el cálculo de la tasa de infiltración para el área de interés.

#### **5.1.3.1. Tipo de suelo**

Según análisis obtenidos por el laboratorio de la facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tomando como referencia puntos clave para la clasificación del suelo en el área del proyecto Progreso VII Derivada mostrados en el anexo 1, se tomó el muestreo contiguo al área propuesta para el desarrollo de esta investigación, denominada “Pilas de colas”, ya que presenta mucha cercanía con unos pocos metros de distancia y sus características físicas son las mismas. De tal análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XXI. **Clasificación de suelos del área de interés**

%			Clase textural
Arcilla	Limo	Arena	
25,91	22,72	51,36	Franco arcilloso arenoso

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Un suelo franco es aquel que presenta una mezcla en proporciones establecidas (Aunque estas pueden variar) de arcilla, limo y arena. Cuyas características hacen que sea un suelo relativamente suelto, con fertilidad media, que es aportada por los limos y con una adecuada retención de humedad gracias a la arcilla y con permeabilidad media, debida a la arena. Para este caso, su clasificación se definió como franco arcilloso arenoso por predominar la arena y arcilla, esta última hace que el suelo posea permeabilidad baja, que dificultan la percolación hacia estratos inferiores.

Dentro del análisis también se puede inferir: El suelo es plástico cuando está húmedo y duro cuando está seco. La reacción es ligeramente alcalina, pH alrededor de 8,00 hasta una profundidad alrededor de 5 cm mayor a 30 cm. La estructura prismática está bien desarrollada; cuando está seco, el suelo se quiebra en agregados angulares a duros, es plástico cuando está húmedo. La reacción es de mediana a ligeramente ácida, pH alrededor de 6,00. Ocupan pendientes muy inclinadas, en muchos lugares con una inclinación mayor del 50 %.

### **5.1.3.2. Descripción del ensayo y obtención de resultados**

Esta prueba fue diseñada por el centro de ingeniería sanitaria Robert A. Taff para determinar la absorción de suelos en pozos y lechos de absorción como alternativa viable, debido a que un pavimento poroso o permeable se trabaja igual se utilizará la misma prueba para el mismo. Con el mismo se pretende determinar la velocidad de absorción del suelo. La prueba se realiza cavando un pozo inicial de 1,00 m de profundidad, que es la mínima de pozo de absorción, en el caso de las zanjas es menos, de igual forma se trabajara en este caso.

- Prueba de absorción: se realiza cavando un pozo inicial de 1,00 m de profundidad para pozos de absorción; en el caso de las zanjas es menos, ya que son sistemas a rasante. Para este caso específicamente se deberá tener en cuenta el grosor promedio de un pavimento en las condiciones que se manejará. Esa será la profundidad donde hará las calicatas. Lo recomendable es utilizar 30 cm ya que esa es una medida razonable que cubre el espesor del concreto permeable.
- Preparación del terreno: se debe limpiar un área de 1,00 m por 1,00 m, desbrozar y retirar todo material orgánico basura y demás, hasta llegar al suelo utilizable o de buenas condiciones; esto quiere decir que se retira toda la capa de suelo orgánico que pueda poseer, si no la posee se puede comenzarse desde la rasante. Una vez se llegue a suelo utilizable, aquel limpio y sin suelo orgánico se debe emparejar de forma que quede a nivel.
- Excavación del pozo: una vez limpia y a nivel se debe excavar el área mencionada, a una profundidad que marque el diseño del pavimento, como se mencionó lo recomendable es utilizar 30,00 cm. Esto asegurará

llegar a una capa de suelo que no tenga raíces de arbustos o grama ni suelo orgánico. Se recomienda no escoger un lugar donde no exista vegetación con raíces profundas.

- Calicatas: se debe realizar al centro una excavación de 30 cm por 30 cm de área dentro del pozo anteriormente descrito con. Debe excavarse hasta la profundidad de 40 cm. Si bien hay parqueos que se diseñan con menor peralte, en esta investigación se comparará con dos materiales: concreto hidráulico y asfáltico; y de este último dos métodos distintos, el de mezcla asfáltica convencional y la mezcla Topmix. El grosor de la carpeta será mayor y junto con la estructura es mejor que sea una profundidad considerable. Por eso se remarca que sea la profundidad mayor obtenida en el diseño del pavimento, este ensayo es para obtener los datos de infiltración para el diseño hidráulico del mismo.

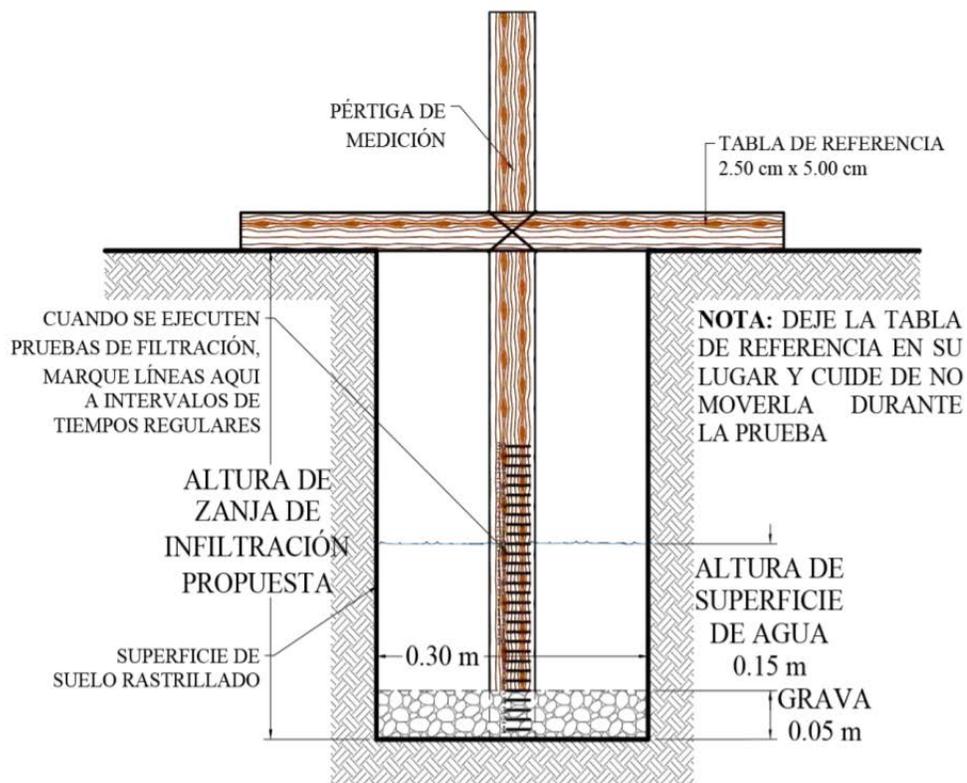
Con un cuchillo debe remodelarse las paredes de las calicatas y sacar todo el material, deben quedar los más ortogonales posibles y con la misma profundidad. Se pondrá grava fina o arena gruesa en lo profundo de cada calicata de aproximadamente 5,00 cm para formar así un cubo de 30x30x35 cm.

Se colocará una estaca de madera que permita realizar mediciones, esto queda a criterio, la forma y dimensiones siempre y cuando sean fáciles de manipular y no molesten cuando se realicen las mediciones.

- Llenado: se debe llenar cuidadosamente de forma lenta sin levantar la arena o grava con agua limpia hasta cubrir 30,00 cm de profundidad desde la superficie de la capa de grava o arena. Se deberá vigilar las primeras 4,00 horas como mínimo cuidando que se mantenga el nivel de agua en 30 cm. Se deberá determinar la tasa de infiltración a 24,00 horas después

de llenado el agujero. Esto simulará la situación de mayor humedad. Para suelos arenosos o con poca arcilla no es esencial este procedimiento.

Figura 31. Esquema de la prueba de infiltración

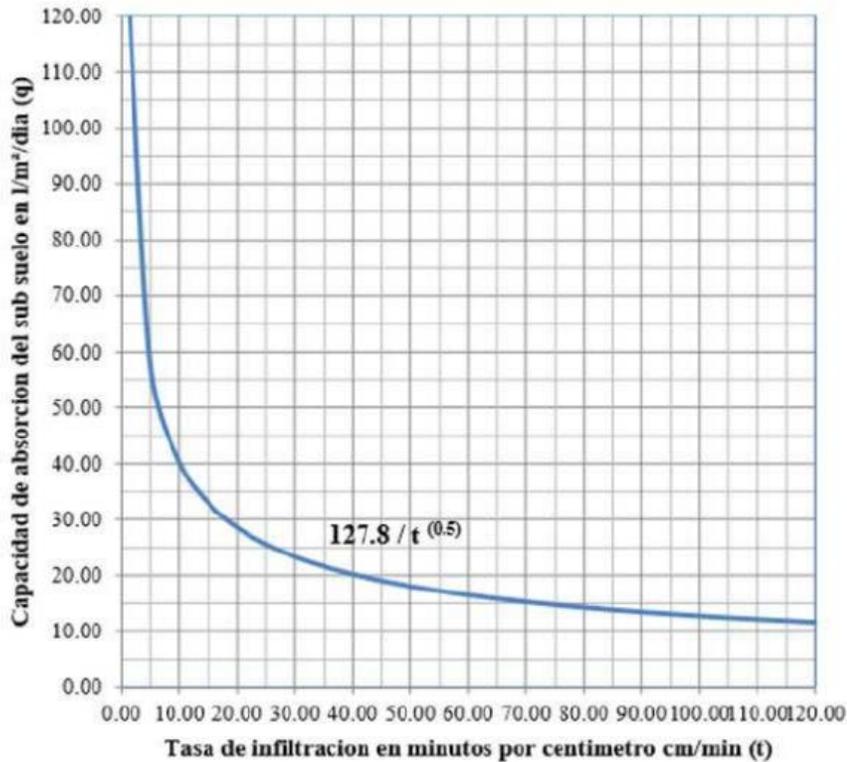


Fuente: Ministerio de Salud del Gobierno de El Salvador. *Propuesta de reglamento técnico salvadoreño para el diseño y construcción de sistemas de tratamiento de agua residuales de tipo ordinario para la zona rural.* p. 24.

- Mediciones: el procedimiento debe seguirse de forma cuidadosa y con el mayor detalle posible. La medición se realizará de la forma siguiente:

- Si aún hay agua de la noche anterior, deberá ajustar a un nivel de 15 cm sobre el nivel de la grava o arena. Mida el descenso a 30,00 min. Este descenso se usa para calcular la tasa de infiltración.
- En caso de no encontrar agua de la noche anterior, llene hasta un nivel de 15,00 cm. Cuidadosamente y sin levantar la arena o grava, y realizar mediciones cada 30,00 min durante 4,00 horas. Manteniendo el nivel de 15,00 cm cuando sea necesario. El descenso que ocurre durante el periodo final de 30 min se usa para calcular la tasa de infiltración. Los decesos, durante los periodos anteriores, proporcionan información para posibles modificaciones del procedimiento para ajustar a las circunstancias locales.
- Si el suelo es arenoso, u otro donde los primeros 15 centímetros se filtran en menos de treinta minutos después del periodo de expansión (ver sección de llenado), el intervalo de tiempo debe ser de 10 min y la prueba de total de una hora de duración. El descenso que ocurra en los últimos 10 min se usa para calcular la tasa de infiltración.
- Consideraciones finales: se debe considerar que el lugar para realizar las pruebas tenga poca pendiente para evitar que en caso de lluvia se inunde. También debe tenerse en cuenta que debe ser un lugar poco frecuentado por animales y persona o tomar las medidas del caso para que no se vea afectado el ensayo ni tampoco se interrumpa la vida diaria de las demás personas; en caso de ser un lugar con mucho tránsito, se tomarán las medidas de precaución necesarias. Se debe procurar que el material que salga de las excavaciones quede almacenado a una distancia prudente y no estorbe que pueda ser llevado de vuelta cuando el ensayo concluya.

Figura 32. **Gráfica para el cálculo de la capacidad de absorción del suelo a partir de la tasa de infiltración encontrada en campo**



Fuente: Ministerio de Salud del Gobierno de El Salvador. *Propuesta de reglamento técnico salvadoreño para el diseño y construcción de sistemas de tratamiento de agua residuales de tipo ordinario para la zona rural.* p .16.

### 5.1.3.3. Índices de infiltración

En el apéndice 3 se muestra los resultados obtenidos realizados en cuatro pruebas de infiltración realizados en el área de interés, con estos resultados se procedió al cálculo de la capacidad de absorción del suelo. Con el método propuesto por el centro de ingeniería sanitaria Robert A. Taff se procedió a la

realización de los cálculos utilizando el gráfico de la figura 16 o a partir de la fórmula:

$$q = \frac{127,8}{(t)^{1/2}}$$

Donde:

$q$ = Capacidad de absorción del subsuelo en l/m<sup>2</sup>/día

$t$ = Tasa de infiltración en minutos por cada cm

Para la toma de las muestras se realizaron dentro del área de interés en cuatro puntos diferentes y para que el muestreo fuera representativo. En la figura 33 muestra la distribución en planta de los puntos de control. Así mismo en la tabla XXII se muestra las coordenadas UTM, NAD 83, zona 15.

Tabla XXII. **Coordenadas de los puntos de control**

<b>No.</b>	<b>Norte</b>	<b>Norte</b>	<b>(msnm)</b>
<b>1</b>	1 634 961,9651	781 171,6334	884,2142
<b>2</b>	1 634 925,8501	781 132,4464	885,2465
<b>3</b>	1 634 897,7339	781 081,0616	886,2879
<b>4</b>	1 634 864,4455	781 099,7715	887,6842

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 33. **Puntos para la realización de la prueba de infiltración**



Fuente: Google maps. *Área de interés, Progreso VII Derivada, San José del Golfo, Guatemala.*  
<https://www.google.com.gt/maps/place/San+Jos%C3%A9+del+Golfo/@14.7726682,-90.3896752,667m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x858993e33c111a77:0x2a80337ae1299bcf!8m2!3d14.7644356!4d-90.3715304?hl=es>. Consulta: 25 de febrero de 2021.

A continuación, en la tabla XXIII se muestran los resultados de infiltración con la ecuación del apartado 5.1.3.3 con base en los resultados de campo obtenidos, mismos presentados en el apéndice 3. La figura 34 muestra los resultados con la gráfica propuesta por el modelo centro de ingeniería sanitaria Robert A. Taff.

Con la media aritmética podemos determinar un valor de 48,04 lt/m<sup>2</sup>/día para la capacidad de absorción del suelo y 7,55 mm/h para el índice de infiltración. Se utilizará para el diseño hidráulico de la propuesta de concreto

permeable que se intenta proponer, así también como en el análisis comparativo con otros métodos disponibles para nuestra región.

Tabla XXIII. **Tasas de infiltración para el área de interés**

No.	Tasa de Infiltración	Capacidad de absorción
	min/cm	lt/m <sup>2</sup> /día
1	7,59	46,37
2	11,11	38,34
3	4,96	57,39
4	6,52	50,04

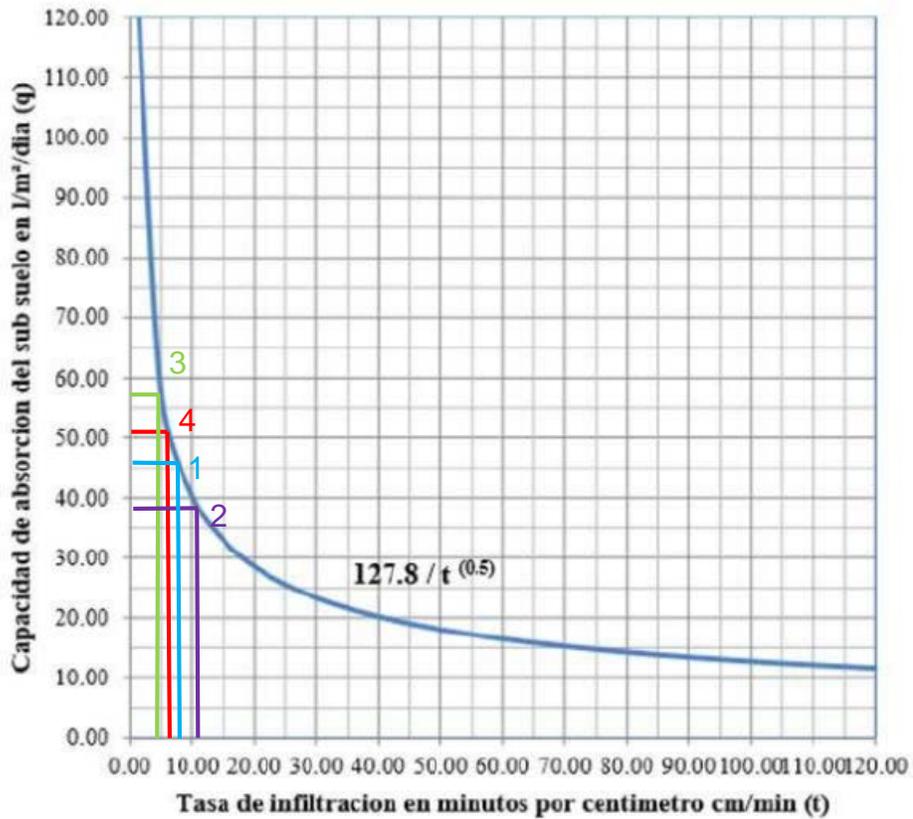
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

La clasificación descrita para el suelo mostrado en la tabla XXI indica un suelo franco-arcilloso-arenoso con una capacidad de absorción de 48,04 lt/m<sup>2</sup>/día, es decir, que la tormenta de diseño que se utilizará no debe sobrepasar esta capacidad, de lo contrario se procedería a la propuesta de un sistema de infiltración parcial (es decir, proponer un sistema de evacuación de aguas, por ejemplo: drenaje francés).

## **5.2. Análisis de comparación**

En este apartado mostraremos una comparación en base a los métodos convencionales de diseño de pavimentos permeables y la propuesta de Topmix. Para comenzar se describirá los requerimientos tanto arquitectónicos como estructurales para la propuesta de la construcción de un área de estacionamiento, encaminamiento y áreas de recreación para los trabajadores que laboran dentro del proyecto minero Progreso VII Derivada.

Figura 34. Resultados de infiltración



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

### 5.2.1. Diseño del elemento arquitectónico para el análisis

La carga de diseño como base para el desarrollo de esta propuesta se determinará de acuerdo con el flujo vehicular que tendrá la estructura durante su periodo de vida útil. En la tabla XXIV se muestra los valores de diseño pronosticados para esta estructura para 7,00 días a la semana durante 24,00 horas.

Tabla XXIV. **Aforo estimado de diseño**

<b>Proyección para 24 horas</b>									
Día	Vehículos de pasajeros						Vehículos de carga		Total
	Motocicletas	Automóviles	Pick-up	SUV (Camionetas)	Microbuses	Bus	C-2	C-3	
Lunes	80	40	60	20	8	4	2	2	216
Martes	80	40	60	20	8	4	2	2	216
Miércoles	80	40	60	20	8	4	2	2	216
Jueves	80	40	60	20	8	4	2	2	216
Viernes	80	40	60	20	8	4	2	2	216
Sábado	80	40	60	20	8	4	2	2	216
Domingo	80	40	60	20	8	4	2	2	216
<b>Total</b>	<b>560</b>	<b>280</b>	<b>420</b>	<b>140</b>	<b>56</b>	<b>28</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>1 512</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

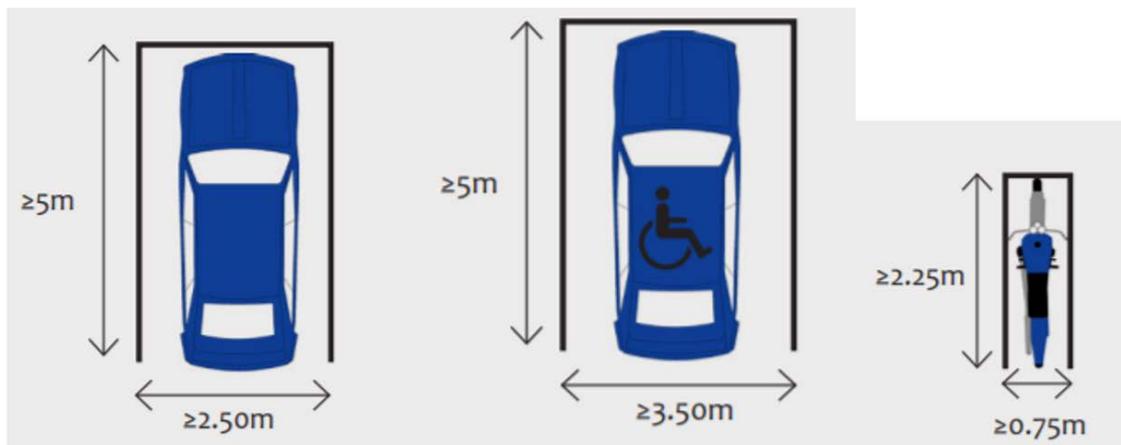
El fin último de esta propuesta es definir un diseño que provoque el mínimo impacto ambiental en la región, para este caso es no interrumpir el ciclo natural del agua, es decir, sin afectar los índices naturales de infiltración del agua proveniente de las precipitaciones en temporada lluviosa.

#### **5.2.1.1. Requerimientos de diseño**

Según la guía de aplicación para la dotación y diseño de estacionamientos de la municipalidad de Guatemala, las medidas mínimas para estacionamiento se muestran en la figura 35. Con base en estas medidas se procedió al diseño del mismo, de acuerdo con la mejor configuración posible (figura 36) se determinó

la mayor capacidad de ocupación para el área en análisis, cantidad que se puede apreciar en la tabla XXV.

Figura 35. Dimensiones de diseño para parqueos



Fuente: Municipalidad de Guatemala. *Guía de aplicación para la dotación y diseño de estacionamientos*. p.32.

Tabla XXV. Capacidad de estacionamientos

Descripción	Dimensiones (Metros)	Cantidad
Plazas para discapacitados	4,62 * 5,35	1
Plazas para motocicletas y bicicletas	3,00 * 5,35	30
Plazas para vehículos	2,50 * 1,00	30

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

### 5.2.1.2. Modelo arquitectónico

El modelo arquitectónico contempla el mejor diseño posible de acuerdo a factores como: aprovechamiento óptimo del espacio, corrientes de viento, paso del tendido eléctrico, toma distribución del agua potable, facilidad de acceso para los automotores, entre otros.

Figura 36. **Propuesta final para la construcción de área denominada campamento**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

A partir del cumplimiento del estudio de impacto ambiental y de las normas vigentes se procedió al diseño de dicha área. Cuya superficie total lo conforman 7 736 m<sup>2</sup> de superficie, todos destinados para áreas de recreación de los trabajadores de dicha empresa, tal y como se puede apreciar en la figura 36, donde muestra la propuesta final de diseño.

### **5.2.2. Diseño de pavimento permeable de concreto hidráulico**

El concreto hidráulico permeable está constituido de manera similar a los demás concretos, con agregado grueso y cemento portland como aglutinante. Similar al pavimento permeable de asfalto, la porosidad de este concreto se debe a la omisión de agregado fino, la densidad del concreto permeable está entre 70 % y 80 % de acuerdo con los concretos convencionales, y tiene una capacidad de infiltración de 81 a 730 L/min/m<sup>2</sup>.

#### **5.2.2.1. Diseño estructural del pavimento de concreto hidráulico**

El método utilizado para el diseño estructural del pavimento de concreto hidráulico se basa en los mismos principios de del método AASHTO 93, ya que su procedimiento calcula de manera más certera la carga de diseño.

- ESAL o W18: se define como la transformación de ejes de un tránsito mixto que circula por una vía a ejes equivalentes de 8,20 ton, 185 kips o 18 000 libras, en el carril de diseño durante la vida útil del pavimento.

Para el diseño estructural del pavimento de concreto hidráulico iniciaremos con el cálculo del TPDA, y para ello se hará una proyección de acuerdo a la necesidad que deseamos cumplir y a esto le llamaremos aforo.

Determinados los volúmenes diarios de diseño del pavimento precedemos al cálculo del ESAL W18, con los siguientes parámetros:

- Periodo de diseño (N): es el tiempo total para el cual se diseña el pavimento en función de la proyección del tránsito, y está dado por la tabla XXVI:
- Factor direccional (FD): es el factor total de flujo vehicular censado: generalmente su valor es 0,50, ya que solo la mitad de los vehículos van en una sola dirección:

Tabla XXVI. **Periodo de diseño de carreteras**

<b>Tipo de carretera</b>	<b>Periodo de diseño (Años)</b>
Autopista regional	20-40
Carreteras Nacionales	15-30
Carreteras Departamentales	
Carreteras Municipales	10-20
Carreteras Vecinales	

Fuente: SIECA. *Manual Centroamericano de normas para el diseño de carreteras regionales.*

p .10.

Tabla XXVII. **Factor de distribución por dirección**

Número de carriles en ambas direcciones	FD %
2	50
4	45
6 o más	40

Fuente: SIECA. *Manual Centroamericano de normas para el diseño de carreteras regionales.*  
p.11.

- Factor de crecimiento (FC): este depende del número de años al que se proyectará el tránsito y la tasa del crecimiento anual vehicular. Además, refleja la medida que aumentará el flujo de vehículos. Puede ser determinado a través de la siguiente formula:

$$FC = \frac{(1 + i)^n - 1}{i} * 365$$

Donde:

$FC$  = Factor de crecimiento

$i$ = Tasa de crecimiento del tránsito (%)

$n$ = Periodo de diseño (Años)

Sustituyendo valores para nuestro caso tenemos:

$$FC = \frac{(1 + 0,03)^{20} - 1}{0,03} * 365 = 9\ 808$$

- Factor de distribución por carril

Tabla XXVIII. **Factor de distribución por carril**

Número de carriles en una sola dirección	Fc'
1	1
2	0,80 – 1,00
3	0,60 – 0,80
4	0,50 – 0,75

Fuente: SIECA. *Manual Centroamericano de normas para el diseño de carreteras regionales.*  
p.11.

Este factor se define por el carril de diseño aquel que recibe el mayor número de ESAL. Para un camino de dos carriles, cualquiera de los dos puede ser el carril de diseño, ya que el tránsito por dirección forzosamente se canaliza a este carril.

Para nuestro caso aplicaremos un  $Fc' = 1$

- Determinación del tránsito de diseño: es el volumen de tránsito para un año cualquiera, siendo el número de veces, que pasa el tránsito por la vía en (n) años:

$$T_D = TPDA * FC * FD * Fc'$$

Donde:

$TPDA =$  Tránsito promedio diario anual  
 $FC =$  Factor de crecimiento  
 $FD =$  Factor de distribución por sentido  
 $Fc' =$  Factor de distribución por carril

Finalmente, para el cálculo del ESAL's tenemos:

$$ESAL's = TD * \text{Factor de carga}$$

Donde:

ESAL's= Carga en ejes equivalentes

TD= Tránsito de diseño

Factor de carga= Factor de carga (tomado de tablas experimentales)

Tabla XXIX. **ESAL de diseño**

Tipo de vehículo	TPDA	TD	Peso por ejes en libras	Tipo de eje	F. ESAL'S	ESAL's diseño
Motocicletas	80	482 800	0	Simple	0	0
		482 800	0	Simple	0	0
Automóviles	40	241 400	2 200	Simple	0,00038	92
		241 400	2 200	Simple	0,00038	92
Pick-up	60	362 100	2 200	Simple	0,00038	138
		362 100	4 400	Simple	0,00038	138
SUV (Camionetas)	20	120 700	2 200	Simple	0,00038	46
		120 700	4 200	Simple	0,0034	410
Microbuses	8	48 280	4 400	Simple	0,0034	164
		48 280	88 800	Simple	0,0502	2 424
Bus	4	24 140	11 000	Simple	0,1265	3 054
		24 140	22 000	Simple	2,35	56 729
C-2	2	12 070	11 000	Simple	0,1265	1 527
		12 070	22 000	Simple	2,35	28 365
C-3	2	12 070	11 000	Simple	0,1265	1 527
		12 070	36 300	Simple	1,4325	17 290
					<b>Total</b>	<b>111 994</b>

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

ESAL o  $W_{18} = 111\,994$  ejes equivalentes de 8,20 ton en el carril de diseño, resultado tomado de la tabla XXIX, donde nos muestra el despliegue de toda la información utilizada para este cálculo.

- Confiabilidad R: de acuerdo con la tabla XXX el valor de confiabilidad R para nuestras condiciones es del 65 %.

Tabla XXX. **Valores de nivel de confiabilidad R**

TIPO DE CAMINOS	TRAFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		NIVEL DE CONFIABILIDAD (R)
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	T <sub>P0</sub>	100,000	150,000	65%
	T <sub>P1</sub>	150,001	300,000	70%
	T <sub>P2</sub>	300,001	500,000	75%
	T <sub>P3</sub>	500,001	750,000	80%
	T <sub>P4</sub>	750,001	1,000,000	80%
Resto de Caminos	T <sub>P5</sub>	1,000,001	1,500,000	85%
	T <sub>P6</sub>	1,500,001	3,000,000	85%
	T <sub>P7</sub>	3,000,001	5,000,000	85%
	T <sub>P8</sub>	5,000,001	7,500,000	90%
	T <sub>P9</sub>	7,500,001	10'000,000	90%
	T <sub>P10</sub>	10'000,001	12'500,000	90%
	T <sub>P11</sub>	12'500,001	15'000,000	90%
	T <sub>P12</sub>	15'000,001	20'000,000	95%
	T <sub>P13</sub>	20'000,001	25'000,000	95%
	T <sub>P14</sub>	25'000,001	30'000,000	95%
	T <sub>P15</sub>		>30'000,000	95%

Fuente: SIECA. *Manual Centroamericano de normas para el diseño de carreteras regionales.*

p. 11.

- Desviación estándar  $S_o$ : de acuerdo con la tabla XXXI, el valor que se adoptará para este diseño será de 0,39.

Tabla XXXI. **Valores de desviación estándar  $S_0$**

CONDICIÓN DE DISEÑO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR ( $S_0$ )	
	Pav. rígido	Pav. flexible
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento sin errores en el tránsito.	0.34	0.44
Variación en la predicción del comportamiento del pavimento con errores en el tránsito.	0.39	0.49

Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p.40.

- Pérdida de serviciabilidad  $\Delta PSI$ : según la guía AASHTO para el diseño de pavimentos, el valor adoptado será de 2,10.

Tabla XXXII. **Pérdida de serviciabilidad de carreteras**

TIPO DE CAMINOS	TRAFICO	EJES EQUIVALENTES ACUMULADOS		ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD INICIAL ( $P_i$ )	ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD FINAL O TERMINAL ( $P_t$ )	DIFERENCIAL DE SERVICIABILIDAD ( $\Delta PSI$ )
Caminos de Bajo Volumen de Tránsito	$T_{P1}$	150,001	300,000	4.10	2.00	2.10
	$T_{P2}$	300,001	500,000	4.10	2.00	2.10
	$T_{P3}$	500,001	750,000	4.10	2.00	2.10
	$T_{P4}$	750,001	1,000,000	4.10	2.00	2.10
Resto de Caminos	$T_{P5}$	1,000,001	1,500,000	4.30	2.50	1.80
	$T_{P6}$	1,500,001	3,000,000	4.30	2.50	1.80
	$T_{P7}$	3,000,001	5,000,000	4.30	2.50	1.80
	$T_{P8}$	5,000,001	7,500,000	4.30	2.50	1.80
	$T_{P9}$	7,500,001	10'000,000	4.30	2.50	1.80
	$T_{P10}$	10'000,001	12'500,000	4.30	2.50	1.80

Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 41.

- Coeficiente de transferencia de carga  $J$ : según la tabla XXXIII el valor que del coeficiente con la cual la carga es transmitida será de 3,80.

Tabla XXXIII. **Coeficiente de transferencia de carga J**

TIPO DE BERMA	J			
	GRANULAR O ASFÁLTICA		CONCRETO HIDRÁULICO	
VALORES J	SI (con pasadores)	NO (con pasadores)	SI (con pasadores)	NO (con pasadores)
	3.2	3.8 – 4.4	2.8	3.8

Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 42.

- Coeficiente de drenaje: para este coeficiente adoptaremos un valor de 1,00, ya que en el diseño hidráulico de este pavimento veremos que las condiciones de drenaje son buenas para la subrasante en cuestión.

Tabla XXXIV. **Coefficientes de drenaje**

Calidad de drenaje	% de tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	> 1%	1 – 5 %	5 – 25%	< 25%
Excelente	1.40 – 1.35	1.35 – 1.30	1.30 – 1.20	1.20
<b>Bueno</b>	1.35 – 1.25	1.25 – 1.15	1.15 – 1.00	<b>1.00</b>
Regular	1.25 – 1.15	1.15 – 1.05	1.00 – 0.80	0.80
Pobre	1.15 – 1.05	1.05 – 0.80	0.80 – 0.60	0.60
Muy pobre	1.05 – 0.95	0.95 – 0.75	0.75 – 0.70	0.40

Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 45.

- Módulo de elasticidad y ruptura del concreto: las consideraciones a tener en cuenta serán para un concreto  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .

Módulo de elasticidad del concreto:

$$E_c = 57\,000\sqrt{F'c} = 3\,115\,170 \text{ psi} = 21\,494,70 \text{ Mpa}$$

Módulo de rotura del concreto:

$$MR = 10 * \sqrt{F'c} = 546,50 \text{ psi} = 3,77 \text{ Mpa}$$

- Módulo efectivo de la subrasante: para el módulo de reacción de la subrasante que en estudios preliminares arrojan un valor de 11,00 para la zona en interés, al aplicar la siguiente fórmula se tiene:

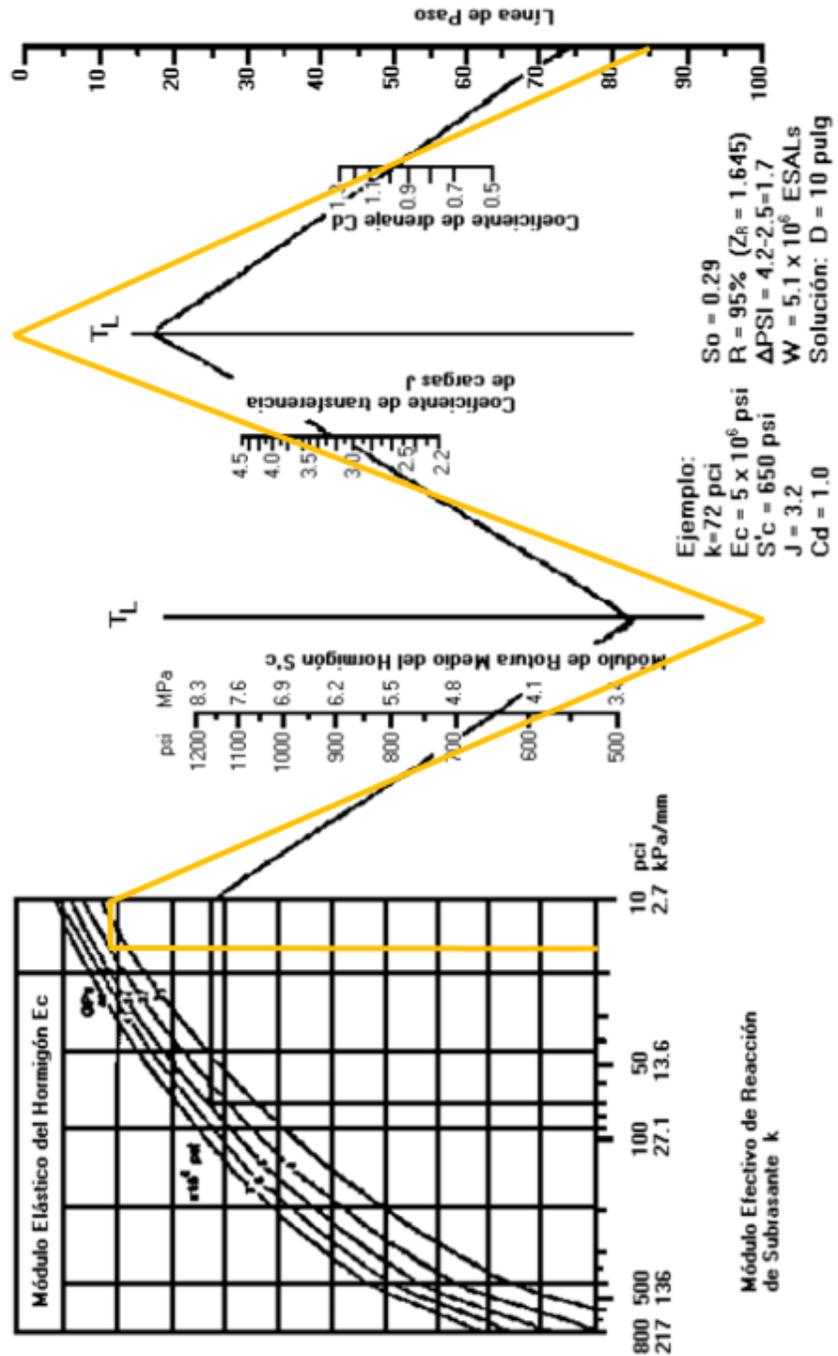
$$MR = 1500 * CBR = 1500 * 11,00 = 16500 \text{ PSI}$$

Tabla XXXV. **Resumen de los parámetros para pavimento permeable de concreto hidráulico**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
ESAL´s	1,20x10 <sup>5</sup>
Desviación estándar So	0,39
Confiabilidad R	65 %
Perdida de serviciabilidad ΔPSI	2,10
Coefficiente de drenaje	1,00
Coefficiente de transferencia de carga J	3.80
Valor de rotura del concreto (Mpa)	3,77
Módulo de elasticidad del concreto (Mpa)	21 494,70
Modulo efectivo de la subrasante (Psi)	16 500

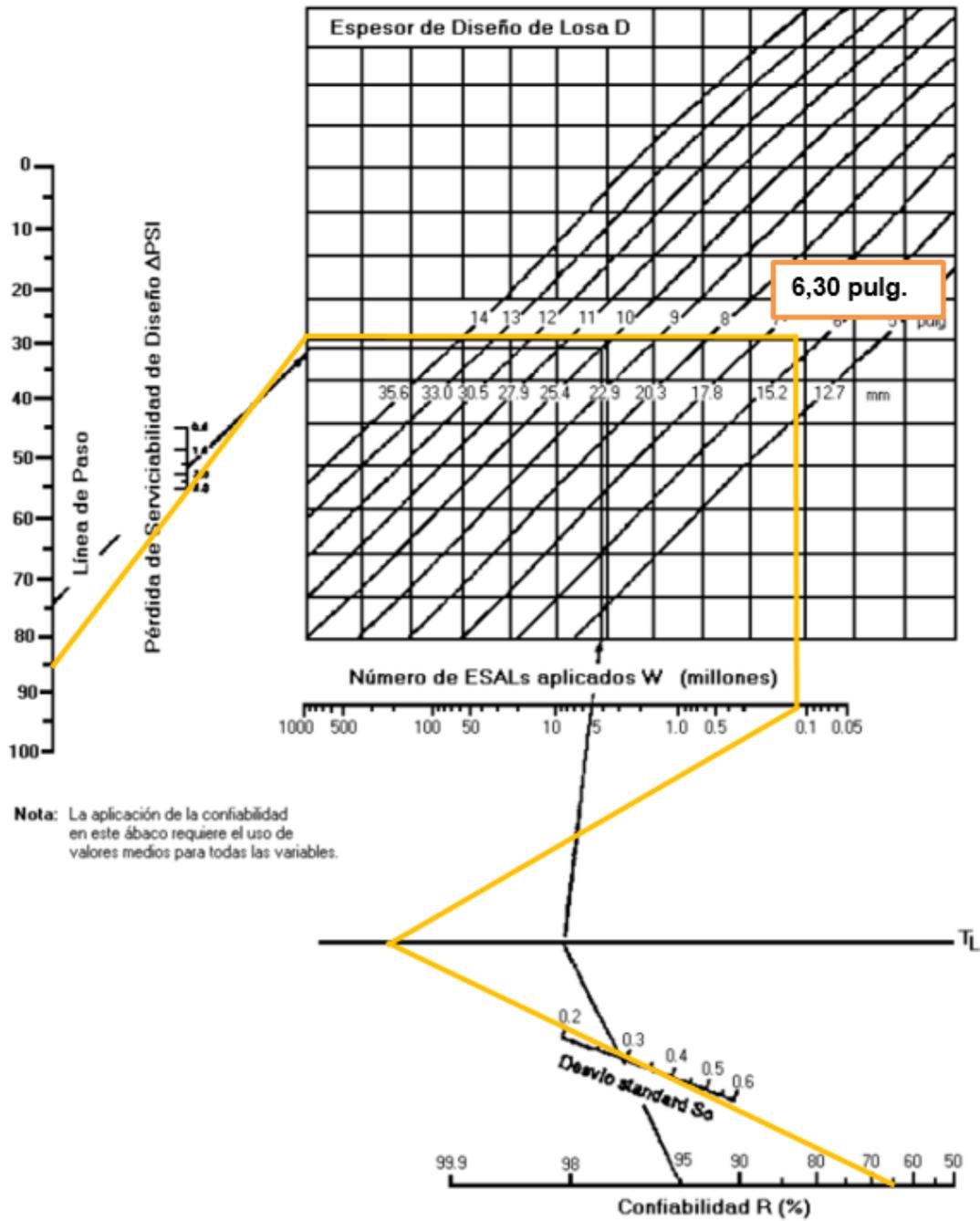
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 37. Monograma para el diseño de pavimentos rígidos, parte 1



Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 70.

Figura 38. Monograma para el diseño de pavimentos rígidos, parte 2



Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 72

Figura 39. **Catalogo de estructuras de pavimento rígido para un valor de J = 3,8 y un periodo de 20 años**

EE		Tp0	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4
		75,001-150,000	150,001-300,000	300,001-500,000	500,001-750,000	750,001-1'000,000
CBR%	MR					
CBR < 6%	< 185PCI (52MPa/m)	13cm 13cm (x)	13cm 13cm (x)	17cm 15cm (x)	18cm 15cm (x)	19cm 15cm (x)
CBR > 6%	> 185PCI (52MPa/m)	13cm 13cm	13cm 13cm	17cm 15cm	18cm 15cm	19cm 15cm
CBR < 10%	< 223PCI (63MPa/m)	13cm 13cm	13cm 13cm	17cm 15cm	18cm 15cm	19cm 15cm

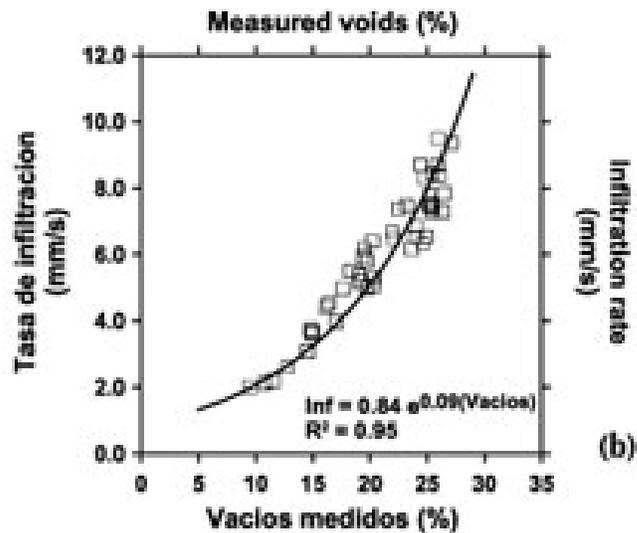
Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 75.

Con la ayuda de los monogramas desarrollados por la AASTHO, mostrados en la figuras 37 y 38, se pudo determinar el espesor de la capa de concreto hidráulico, tomando en cuenta todos los parámetros de nuestro lugar de interés: se determinó el espesor de la estructura estará conformada por una losa de concreto de 6,3 pulg o su equivalente, 16,00 cm, con una resistencia de 210 kg/cm<sup>2</sup>, además la subbase granular con el apoyo de la figura 39 tendrá un espesor de 15,00 cm con un CBR al 80 % y no menor de 30 %.

De acuerdo con gráfica de la figura del ACI 522R-10, muestra que para un concreto permeable de 210 kg/cm<sup>2</sup> (20 Mpa) debe contener un máximo de del 15 % al 17 % de porosidad, y con este valor de porosidad será capaz de infiltrar un volumen de 125,00 mm/h en una superficie nueva, y un 31,25 mm/h para una superficie totalmente colmatada.

Con el valor entre el 15 % al 17 % de porosidad de losa de concreto se podrá definir el diseño de mezcla, que según el ACI 522R-10 debe contener una relación w/c de 0,35.

Figura 40. **Gráfica resistencia vs. porosidad vs. tasa de infiltración**



Fuente: American Concrete Institute. *ACI 522R-10*. p. 23.

### 5.2.2.2. Diseño hidráulico del pavimento de concreto hidráulico

Para el diseño hidráulico para el concreto hidráulico se utilizó las fórmulas de los apartados 3.4.2 y 3.4.3 del capítulo 3. Primero se procedió al cálculo del volumen del afluente, con la ayuda de las curvas intensidad-duración-frecuencia realizadas para esta investigación apoyados en los datos de precipitaciones proporcionados por el INSIVUMEH desde 1970 a la fecha, la podemos observar en el apéndice 1. El volumen del afluente o el volumen acumulado de agua lluvia,  $V_{afl}(d)$ , en metros cúbicos, para un tiempo  $t$ , en horas, se calcula como:

$$V_{afl}(d) = 1.25(0,001C \cdot I_d A d) = 0,0125C \cdot A \cdot P_d^T$$

Donde:

- $C$  = Coeficiente de escorrentía superficial correspondiente al área total aportante  
 $A$  = Área total aportante (m<sup>2</sup>)  
 $I_d$  = Intensidad de la lluvia de período de retorno  $T$  y duración  $d$  (mm/h)  
 $d$  = Tiempo acumulado de lluvia (horas)  
 $P_d^T$  = Precipitación acumulada en el tiempo  $d$  para la lluvia de periodo de retorno de  $T$  años

El valor de  $V_{afl}(d)$  en función  $d$  se denomina “curva de recarga”. Se recomienda multiplicar por un factor de seguridad de 1,25 el volumen acumulado para considerar la porción de lluvia que cae antes y después de la porción más intensa de la tormenta.

El volumen de afluente se calcula con el objetivo de conocer la cantidad de agua máxima a la cual puede estar expuesta la obra; por ende, es la cantidad de agua la cual va a ser filtrada.

Para el cálculo del volumen de infiltración apoyándose en los resultados de la tabla XXIII y aplicando la siguiente ecuación obtendremos la capacidad del suelo al estar expuesto a condiciones máximas de humedad:

$$V_{inf}(d) = 0,001(f \cdot C_s \cdot A_{pav} \cdot d)$$

Donde:

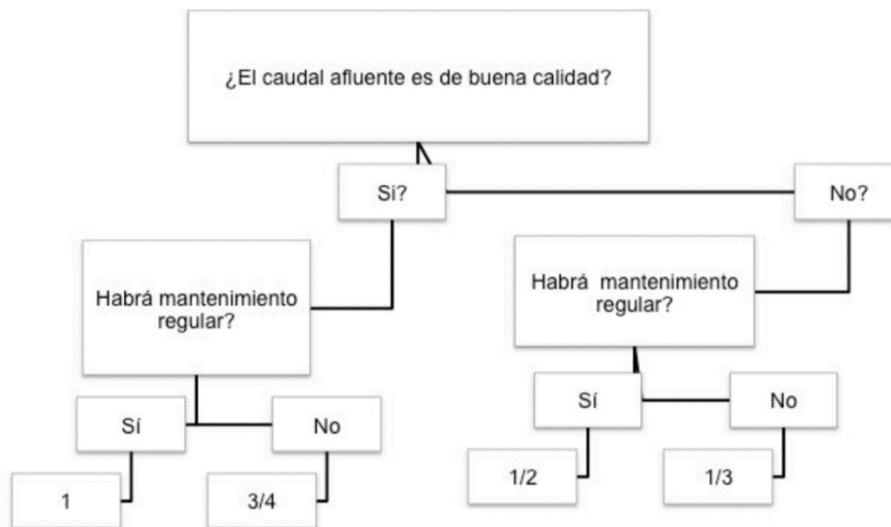
$f$ = Capacidad de infiltración del suelo (mm/h)

$A_{pav}$ = Área del pavimento poroso (m<sup>2</sup>)

$d$ = Tiempo acumulado de lluvia (h)

$C_s$ = Coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de infiltración dependiendo de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento que toma en cuenta los efectos de la colmatación en el tiempo que experimenta el suelo.

Figura 41. **Metodología para el cálculo de  $C_s$  de acuerdo al mantenimiento y calidad del afluente**



Fuente: POLANCO ANDRADE, Ángela María; SANCHEZ VEGA, Ángela María. *Diseño hidráulico de losas en pavimento poroso rígido como estructuras complementarias al drenaje pluvial de Bogotá*. p.25.

Se recomienda utilizar el procedimiento de la figura 41 para determinar el coeficiente de seguridad que afecta la infiltración. Cuando un pavimento permeable es nuevo ocasionará una velocidad de infiltración mayor ya que sus poros están nuevos y se necesitará un volumen de agua para primero saturar estas cavidades y posteriormente iniciar el proceso de paso libre al agua. Después de un periodo determinado los sólidos suspendidos en el agua y demás minerales van llenando los poros del pavimento, reduciendo así su capacidad de infiltración: es lo que llamaremos un pavimento colmatado. Existe un procedimiento de limpieza del pavimento permeable como la inyección de aire por ejemplo, que ayudan a recuperar los espacios de los poros anteriormente colmatados pero no en su totalidad, es lo que se nombrará un pavimento renovado.

El volumen de almacenamiento necesario se calcula como:

$$V_{alm} = \max(V_{afl}(d) - V_{inf}(d))$$

Si la tasa de infiltración del terreno es siempre mayor que la intensidad de la lluvia, incluso que la de menor duración, entonces no se requiere un volumen de acumulación en la subbase, sino que bastará con la superficie de contacto con la subrasante para la infiltración. Una vez aplicada la ecuación anterior obtenemos los resultados, mismos que están plasmados en la tabla XXXVI. El tiempo que se ha utilizado para los cálculos fue de 24,00 horas, ya que necesitamos determinar las máximas condiciones en las que el pavimento estará expuesto.

El espesor necesario de la subbase para que satisfaga las condiciones hidrológicas está definido por:

$$e = \frac{V_{alm}}{\eta * A_{pav}}$$

Donde  $\eta$  es la porosidad del material de la subbase, por lo general es 0,30.

Finalmente se calculó el tiempo de vaciado del volumen de almacenamiento de la subbase, se recomienda que sea inferior a 48,00 horas, que se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$t_m = \frac{\eta * e}{c_s * f}$$

Donde:

- $t_m$ = Tiempo de vaciado de la capa subbase (Horas)
- $\eta$ = Porosidad de la capa de subbase
- $e$ = Espesor definitivo asignado a la subbase (mm)
- $c_s$ = Coeficiente de seguridad adoptado
- $f$ = Tasa de infiltración del suelo o de la subrasante (mm/h)

Por medio del cálculo del volumen de almacenamiento se determina las características de la subbase, necesario para almacenar el volumen de agua que recibirá. Dentro de esas características se encuentra el espesor de la subbase y el tipo de agregado del cual estará compuesta. El espesor debe poseer las dimensiones adecuadas para poder retener el agua hasta que esta pueda ser filtrada por el suelo o transportada por medio de drenajes. Para este caso aplicando las condiciones máximas de precipitaciones (tiempo de duración máxima de 24,00 horas para un periodo de retorno de 25 años) se determinó que solo se necesitará 1,00 cm de espesor de subbase para cumplir con las condiciones de diseño hidráulico pero no así para las condiciones estructurales.

Para este caso se tomará el valor de espesor de la subbase con relación al diseño estructural para la determinación de tiempo de vaciado de sistema, es decir 15 cm, que necesita 18,00 horas para el vaciado de todo el sistema, ver tabla XXXVI.

Tabla XXXVI. **Valores de almacenamiento para una tormenta con duración 24 horas**

Tiempo de retorno	Condición	Intensidad de lluvia (mm/h)	V <sub>aflu</sub>	V <sub>inf</sub>	V <sub>alm</sub>	e	t <sub>m</sub>
T-2	Nuevo	3,03	220,81	1 001,18	-780,37	-0,35	7,95
	Renovado	3,03	220,81	667,45	-446,64	-0,20	11,92
	Colmatado	3,03	220,81	440,52	-219,71	-0,10	18,06
T-5	Nuevo	3,81	302,77	1 001,18	-698,41	-0,32	7,95
	Renovado	3,81	302,77	667,45	-364,68	-0,17	11,92
	Colmatado	3,81	302,77	440,52	-137,75	-0,06	18,06
T-10	Nuevo	4,32	362,84	1 001,18	-638,33	-0,29	7,95
	Renovado	4,32	362,84	667,45	-304,61	-0,14	11,92
	Colmatado	4,32	362,84	440,52	-77,67	-0,04	18,06
T-25	Nuevo	4,97	461,44	1 001,18	-539,73	-0,24	7,95
	Renovado	4,97	461,44	667,45	-206,01	-0,09	11,92
	<b>Colmatado</b>	<b>4,97</b>	<b>461,44</b>	<b>440,52</b>	<b>20,92</b>	<b>0,01</b>	<b>18,06</b>
T-100	Nuevo	5,93	590,07	1 001,18	-411,11	-0,19	7,95
	Renovado	5,93	590,07	667,45	-77,38	-0,04	11,92
	Colmatado	5,93	590,07	440,52	149,55	0,07	18,06

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

### **5.2.3. Diseño de pavimento permeable de mezcla asfáltica estándar**

Un pavimento asfáltico permeable, también conocido como poroso, está constituido por mezcla parecida al de las mezclas asfálticas estándar por lo que se puede utilizar el método de la AASHTO 93; pero con un 20 % más de contenido de vacíos, debido a esto se utiliza menos betún y es necesario usar aditivos. La infiltración de estas mezclas de entre 12,50 a 20,00 L/min/m<sup>2</sup> según la Asociación Nacional de Pavimentos Asfálticos de Estados Unidos (NAPA por sus siglas en inglés).

#### **5.2.3.1. Diseño estructural del pavimento de mezcla asfáltica estándar**

Para el diseño estructural del pavimento asfáltico se utilizará los mismos parámetros que del pavimento permeable de concreto hidráulico, ya que el procedimiento propuesto por la AASHTO es el mismo, con la variante que se modificarán algunos parámetros debido a los materiales que constituyen dicho pavimento. Para el cálculo de los espesores de carpeta de rodadura como de la subbase granular se utilizará el procedimiento propio para este tipo de pavimento. De acuerdo con el apartado 5.2.2 los valores utilizados serán:

Tabla XXXVII. **Resumen de los parámetros para pavimentos permeables de concreto asfáltico**

Parámetro	Valor
ESAL´s	1,20x10 <sup>5</sup>
Desviación estándar So	0,49
Confiabilidad R	65 %
Perdida de serviciabilidad ΔPSI	2,10
Coefficiente de drenaje	1,00
Coefficiente de transferencia de carga J	4,40
Modulo efectivo de la subrasante (Psi)	16 500

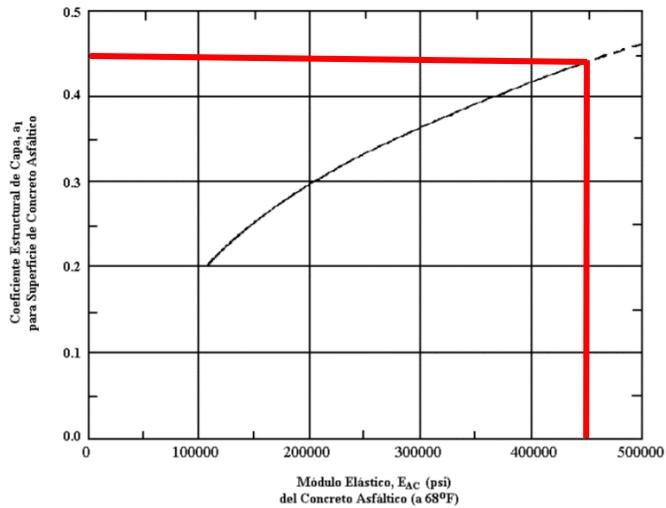
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 42. **Perfil para pavimento permeable de concreto asfáltico**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Figura 43. **Ábaco para estimar el numero estructural de la carpeta asfáltica “a<sub>1</sub>”**



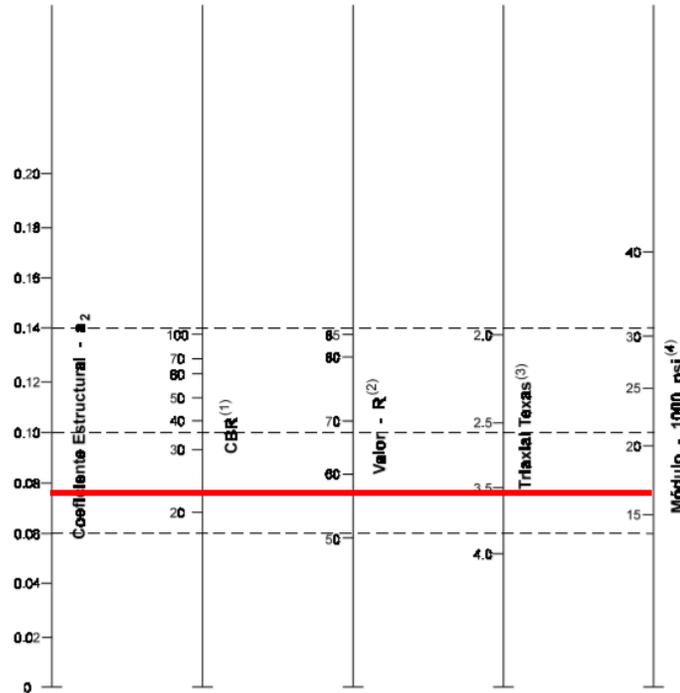
Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 72.

Para el cálculo de los espesores  $D_1$  y  $D_2$  nos apoyaremos de las siguientes ecuaciones:

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} \quad D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 m_2}$$

Para obtener el valor de  $a_1$ , nos apoyaremos en la figura 43, cuyo módulo elástico del concreto asfáltico es  $E_c = 450\,000$  psi, dando como resultado para  $a_1$  un valor de 4,50 y para el valor de  $a_2$  a través de la figura 44 con el módulo de resistencia de la rasante cuyo valor es 16 000 psi da como resultado 0,08.

Figura 44. **Ábaco para estimar el número estructural de la carpeta asfáltica “a<sub>2</sub>”**



Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 72.

Para los valores de  $SN_2$  y  $SN_1$  aplicamos los valores de la tabla XXXVII en el monograma de la figura 45 para obtener dichos valores:

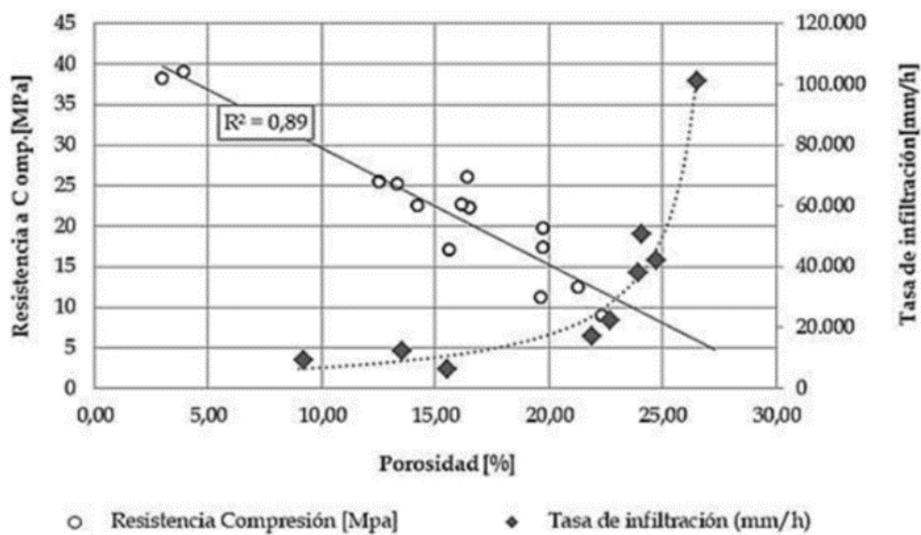
$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{1,7}{0,45} = 3,77 \approx 4''$$

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 m_2} = \frac{2,2 - 1,7}{0,08 * 1,00} = 6,25 \approx 6,5''$$

De acuerdo la gráfica de la figura 45, para un concreto asfáltico permeable no menor a de 210 kg/cm<sup>2</sup> ó 20 Mpa (carga de diseño) debe contener un máximo

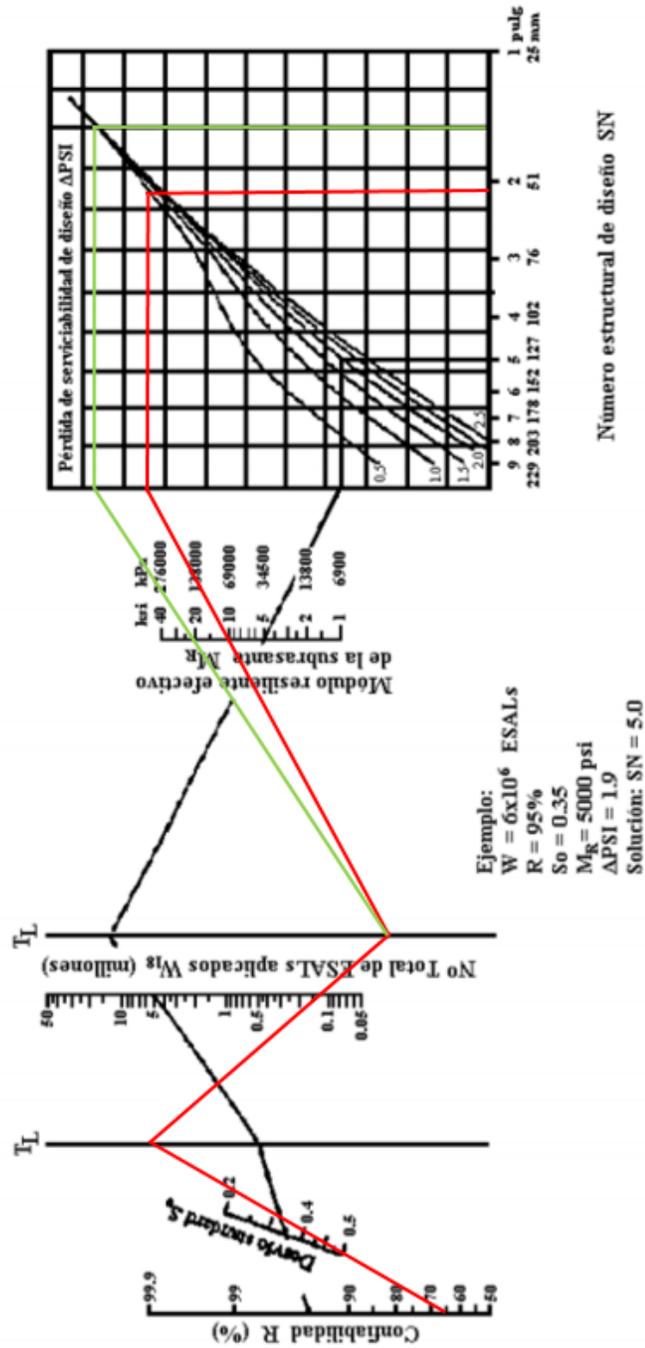
de del 20 % de porosidad, y con este valor de porosidad será capaz de infiltrar un volumen de 55 mm/h en una superficie nueva, y un 13,75 mm/h para una superficie totalmente colmatada.

Figura 45. **Valores de porosidad vs. velocidad de infiltración para un pavimento asfáltico permeable**



Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 80.

Figura 46. Monograma para el diseño de pavimento asfáltico permeable



Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 80.

### **5.2.3.2. Diseño hidráulico del pavimento de mezcla asfáltica estándar**

Las condiciones de precipitación serán las mismas que para el diseño de un pavimento permeable de concreto hidráulico. Es decir que para un valor de la tormenta máxima cuya intensidad de 4,97 mm/h (tormenta máxima a 24,00 horas con un periodo de retorno de 25 años) obtendremos un valor de afluente de 461,44 m<sup>3</sup> y cuyas condiciones existentes de la subrasate hacen que sea capaz de infiltrar en toda el área en análisis un volumen de 440,52 m<sup>3</sup>. La variante radica en el tiempo de vaciado del todo el sistema, es decir, que ahora se tendrá un tiempo de 19,27 horas para que el sistema esté totalmente vacío para una nueva tormenta máxima.

Por medio del cálculo del volumen de almacenamiento se determina las características de la subbase, necesario para almacenar el volumen de agua que recibirá. Dentro de esas características se encuentra el espesor de la subbase y el tipo de agregado del cual estará compuesta. El espesor debe poseer las dimensiones adecuadas para poder retener el agua hasta que esta pueda ser filtrada por el suelo o transportada por medio de drenajes. Para este caso aplicando las condiciones máximas de precipitaciones, se determinó que solo se necesitará 1,00 cm de espesor de subbase para cumplir con las condiciones de diseño hidráulico pero no así para las condiciones estructurales. Para este caso se tomará el valor de espesor de la subbase con relación al diseño estructural para la determinación de tiempo de vaciado de sistema, es decir 16 cm, necesitando así un tiempo de 19,27 horas para el vaciado de todo el sistema. Ver tabla XXXVIII.

Tabla XXXVIII. **Valores de almacenamiento para una tormenta con duración 24 horas**

Tiempo de retorno	Condición	Intensidad de lluvia (mm/h)	V aflu	V inf	V alm	E	tm
T-2	Nuevo	3,03	220,81	1 001,18	-780,37	-0,35	8,48
	Renovado	3,03	220,81	667,45	-446,64	-0,20	12,72
	Colmatado	3,03	220,81	440,52	-219,71	-0,10	19,27
T-5	Nuevo	3,81	302,77	1 001,18	-698,41	-0,32	8,48
	Renovado	3,81	302,77	667,45	-364,68	-0,17	12,72
	Colmatado	3,81	302,77	440,52	-137,75	-0,06	19,27
T-10	Nuevo	4,32	362,84	1 001,18	-638,33	-0,29	8,48
	Renovado	4,32	362,84	667,45	-304,61	-0,14	12,72
	Colmatado	4,32	362,84	440,52	-77,67	-0,04	19,27
T-25	Nuevo	4,97	461,44	1 001,18	-539,73	-0,24	8,48
	Renovado	4,97	461,44	667,45	-206,01	-0,09	12,72
	Colmatado	4,97	461,44	440,52	20,92	0,01	19,27
T-100	Nuevo	5,93	590,07	1 001,18	-411,11	-0,19	8,48
	Renovado	5,93	590,07	667,45	-77,38	-0,04	12,72
	Colmatado	5,93	590,07	440,52	149,55	0,07	19,27

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

#### 5.2.4. **Diseño de pavimento permeable de mezcla asfáltica Topmix**

Entre las soluciones en mezcla asfáltica se encuentra la mezcla Topmix de la empresa británica TARMAC, la que será punto de comparación de esta investigación con las tecnologías ya existentes. Este producto ofrece una velocidad de drenaje de entre 150 y 1 000 L/min/m<sup>2</sup>, únicamente la carpeta asfáltica, con valores superiores a los de las demás mezclas asfálticas permeables e incluso a los pavimentos de mezclas de concreto hidráulico, con un porcentaje de vacíos de entre 20 % y 35 %. Comparada con la mezcla

estándar, da un alto grado de resistencia a la fricción, lo que lo hace realmente bueno para parqueos, encaminamientos, vías urbanas y hasta para subbase de carpeta asfáltica. El agua que entra en contacto con este concreto se almacena bajo dicha capa (volumen de almacenamiento) hasta que comienza a evaporarse, ayudando así a mantener el agua en reposo para propiciar así también la infiltración.

#### **5.2.4.1. Diseño estructural del pavimento de mezcla asfáltica Topmix**

La composición básica de un concreto permeable es cemento portland, agregado grueso, básicamente granito triturado a un tamaño de ¼", un agregado fino (el 10 % del agregado grueso) compuesto por sílica y aditivos.

Aunque la compañía TARMAC ya tiene definidos espesores estándar para según sus usos (ver tabla XXXIX), recomienda que se utilice el método AASHTO para el diseño de los espesores de las capas de subbase y de concreto permeable. Se utilizará todos los pasos del apartado 5.2.3.1 con la variación que se introducirán los valores para las condiciones específicas del Topmix.

Para el cálculo de  $a_1$  se tomará el valor de 2,50 N/mm<sup>2</sup> (360 000 psi) para el módulo de elasticidad de la mezcla Topmix, utilizando la figura 43 el valor para  $a_1 = 0,38$ , para el valor de  $a_2$ , seguirá siendo 0,08 ya que las condiciones del suelo no siguen variado.

Tabla XXXIX. **Especificaciones de diseño para mezclas Topmix**

Hormigón permeable (150 mm)	A una profundidad de 150 mm, el hormigón permeable es adecuado, para uso en áreas que están sujetas a cargas de vehículos comerciales ligeros hasta 7,50 toneladas
Agregado permeable Sub-base (200 mm)	Se requiere el uso de un agregado "sin finos" de clasificación gruesa de ¼" con una relación de vacíos del 30 % para garantizar la continuidad del drenaje libre desde la parte superior.
Membrana geotextil	Dentro de un sistema de infiltración completo, la membrana requerirá una permeabilidad velocidad de al menos 1 000 mm/h, para mantener las tasas de drenaje libres.
Permeabilidad del suelo	El suelo subyacente en un sistema de infiltración completo debe tener una tasa de permeabilidad de al menos 0,01 m/h, donde el área drenada por el hormigón permeable está en una proporción de 1:1. Cuando la permeabilidad es inferior a 0,01 m/h donde el nivel freático es dentro de 1 m del nivel del suelo, un sistema de infiltración completo no sería viable
Relación CBR	Se requiere una capa de cobertura adicional donde no se requiere CBR de sub-grado del 5 %.
Carga	Este diseño se ha desarrollado teniendo en cuenta las siguientes aplicaciones; estacionamiento residencial, áreas peatonales y ocasionales comerciales ligeros vehículo con una carga útil de hasta 7,50 toneladas.
Construcción de senderos	Para la construcción de aceras, la profundidad del hormigón permeable puede ser reducida a 100 mm, debido a la disminución de las cargas impuestas.

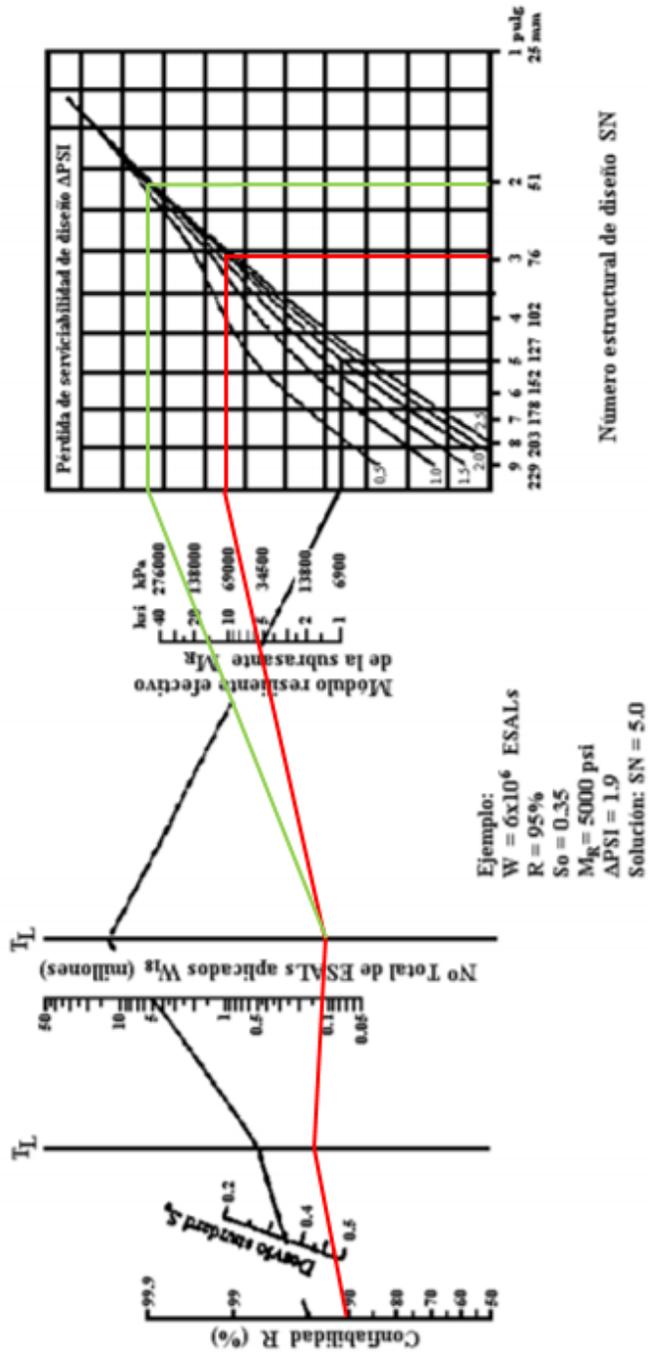
Fuente: Topmix. *Solution guide. Tarmac.* p.24.

Tabla XL. **Resumen de los parámetros para pavimentos permeables Topmix**

Parámetro	Valor
ESAL´s	1,20x10 <sup>5</sup>
Desviación estándar So	0,49
Confiabilidad R	90 %
Perdida de serviciabilidad ΔPSI	2,10
Coefficiente de drenaje	1,00
Coefficiente de transferencia de carga J	4,40
Modulo efectivo de la subrasante (Psi)	16 500

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 47. Monograma para el diseño de pavimento asfáltico permeable



Fuente: AASHTO. *Diseño de estructuras de pavimentos*. p. 80.

Aplicando los valores de la tabla XL en el monograma de la figura 47 obtenemos los valores de  $SN_1= 2,00$  y  $SN_2= 3,00$ .

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1} = \frac{2,00}{0,38} = 5,22 \approx 6''$$

$$D_2 = \frac{SN_2 - SN_1}{a_2 m_2} = \frac{3,00 - 2,00}{0,08 * 1,00} = 12,5 \approx 13''$$

Comparando los valores de diseño ya dados por el fabricante ver tabla XXXIX y con nuestros cálculos anteriores, podemos observar que estamos dentro del rango de valores, por lo que para nuestro diseño final tendremos una estructura conformada por una subbase de 13" (30 cm) y un grosor de losa de 6" (15 cm).

La eficiencia para esta estructura según Tarmac para estas condiciones dadas, es de 650,00 mm/h para una estructura nueva y 162,50 mm/h para un pavimento totalmente colmatado. Es decir que la eficiencia comparada con la de un pavimento permeable hidráulico y asfáltico es por mucho superior.

#### **5.2.4.2. Diseño hidráulico del pavimento de mezcla asfáltica Topmix**

Las condiciones de precipitación serán las mismas que para el diseño de un pavimento permeable de concreto hidráulico y concreto asfáltico. Es decir que para un valor de la tormenta máxima cuya intensidad de 4,97 mm/h (Tormenta máxima a 24,00 horas con un periodo de retorno de 25 años) obtendremos un valor de afluente de 461,44 m<sup>3</sup> y cuyas condiciones existentes de la subrasante hacen que sea capaz de infiltrar en toda el área en análisis un volumen de 440,52 m<sup>3</sup>. La variante radica en el tiempo de vaciado del todo el sistema, es decir

que ahora se tendrá un tiempo de 30,10 horas para que el sistema esté totalmente vacío para una nueva tormenta máxima.

Tabla XLI. **Valores de almacenamiento para una tormenta con duración 24 horas**

Tiempo de retorno	Condición	Intensidad de lluvia (mm/h)	V aflu	V inf	V alm	e	tm
T-2	Nuevo	3,03	220,81	1 001,18	-780,37	-0,35	13,25
	Renovado	3,03	220,81	667,45	-446,64	-0,20	19,87
	Colmatado	3,03	220,81	440,52	-219,71	-0,10	30,10
T-5	Nuevo	3,81	302,77	1 001,18	-698,41	-0,32	13,25
	Renovado	3,81	302,77	667,45	-364,68	-0,17	19,87
	Colmatado	3,81	302,77	440,52	-137,75	-0,06	30,10
T-10	Nuevo	4,32	362,84	1 001,18	-638,33	-0,29	13,25
	Renovado	4,32	362,84	667,45	-304,61	-0,14	19,87
	Colmatado	4,32	362,84	440,52	-77,67	-0,04	30,10
T-25	Nuevo	4,97	461,44	1 001,18	-539,73	-0,24	13,25
	Renovado	4,97	461,44	667,45	-206,01	-0,09	19,87
	Colmatado	4,97	461,44	440,52	20,92	0,01	30,10
T-100	Nuevo	5,93	590,07	1 001,18	-411,11	-0,19	13,25
	Renovado	5,93	590,07	667,45	-77,38	-0,04	19,87
	Colmatado	5,93	590,07	440,52	149,55	0,07	30,10

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Según las condiciones hidráulicas que debe satisfacer el espesor de la capa de subbase para un valor de afluente dado y aplicando las fórmulas para el espesor de la subbase en relación a la tormenta máxima, no da un valor de 1,00 cm. Con este valor cumple con las condiciones hidráulicas, es decir crear un

volumen para propiciar la infiltración del sistema, pero no así para las condiciones estructurales. Los cálculos para el espesor estructural son de 13” o 25 cm. Se necesita así un tiempo de 30,10 horas para el vaciado de todo el sistema para que ocurra de nuevo una tormenta máxima. Ver tabla XLI.

### **5.3. Modelos de comparación**

La metodología empleada para dimensionar estructuras de pavimento poroso es utilizada como alternativa a estructuras complementarias al drenaje pluvial. Para este trabajo la presente metodología se aplicó con el fin de dimensionar la óptima estructura de escurrimiento para un periodo de retorno de 25 años.

#### **5.3.1. Comparación precipitación-volumen de almacenaje**

Cuando un pavimento permeable es nuevo ocasionará una velocidad de infiltración mayor ya que sus poros están nuevos y se necesitará un volumen de agua para primero saturar estas cavidades y posteriormente iniciar el proceso de paso libre al agua. Después de un periodo determinado de tiempo los sólidos suspendidos en el agua y demás minerales con el paso del tiempo van llenando los poros del pavimento, reduciendo así su capacidad de infiltración, es lo que llamaremos un pavimento colmatado. Existe un procedimiento de limpieza del pavimento permeable como la inyección de aire, por ejemplo, que ayudan a recuperar los espacios de los poros anteriormente colmatados pero no en su totalidad, es lo que se nombrará un pavimento renovado.

Para un periodo de retorno de 25 años y para las condiciones de pavimento nuevo, figura 48, la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 120,00 min en condiciones extremas. Es decir que este es el tiempo

que tardará en saturar toda la estructura porosa y empezará la infiltración en la subrasante desde iniciada la tormenta máxima o tormenta de diseño.

Figura 48. **Almacenamiento requerido para un pavimento en condiciones nuevas**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

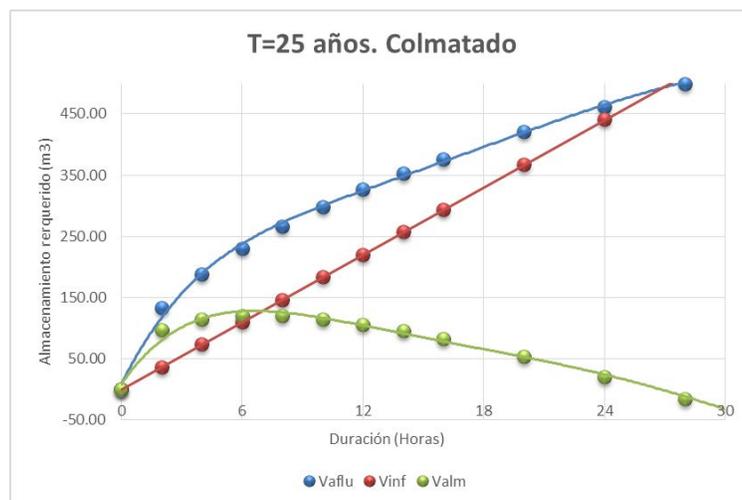
Para las condiciones de pavimento renovado, la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 240,00 min, figura 49. Transcurrido este tiempo podemos observar en la gráfica (línea verde) que en este punto comienza a decaer el sistema. Las condiciones de infiltración de la subrasante la hacen que inicie el vaciado del sistema, la duración total de vaciado dependerá del espesor de la subbase adoptada de acuerdo a cada sistema: pavimento poroso de concreto hidráulico, pavimento poroso de concreto asfáltico y pavimento poroso utilizando Topmix.

Figura 49. **Almacenamiento requerido para una pavimento en condiciones renovadas**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Figura 50. **Almacenamiento requerido para una pavimento en condiciones colmatadas**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Para un periodo de retorno de 25 años y para las condiciones de pavimento colmatado, la máxima altura de almacenamiento se presenta en una duración de 360,00 min en condiciones extremas. Trascurrido este tiempo, como podemos observar en la línea de tendencia verde, esta llega a su máximo valor en este punto e iniciará el proceso de infiltración desde la subrasante. Con las condiciones de la subrasante necesitará 18,00 horas de vaciado para un pavimento de concreto hidráulico, 19,00 horas para un pavimento de concreto asfáltico y 30,00 horas para una estructura Topmix.

De las figuras 48, 49 y 50 se observa que al no hacer el mantenimiento adecuado a la estructura de pavimento, su rendimiento se ve afectado negativamente. En primer lugar el tiempo de vaciado es mucho mayor. Y luego porque con el paso del tiempo va perdiendo sus capacidades de infiltración.

### **5.3.2. Infiltración del pavimento**

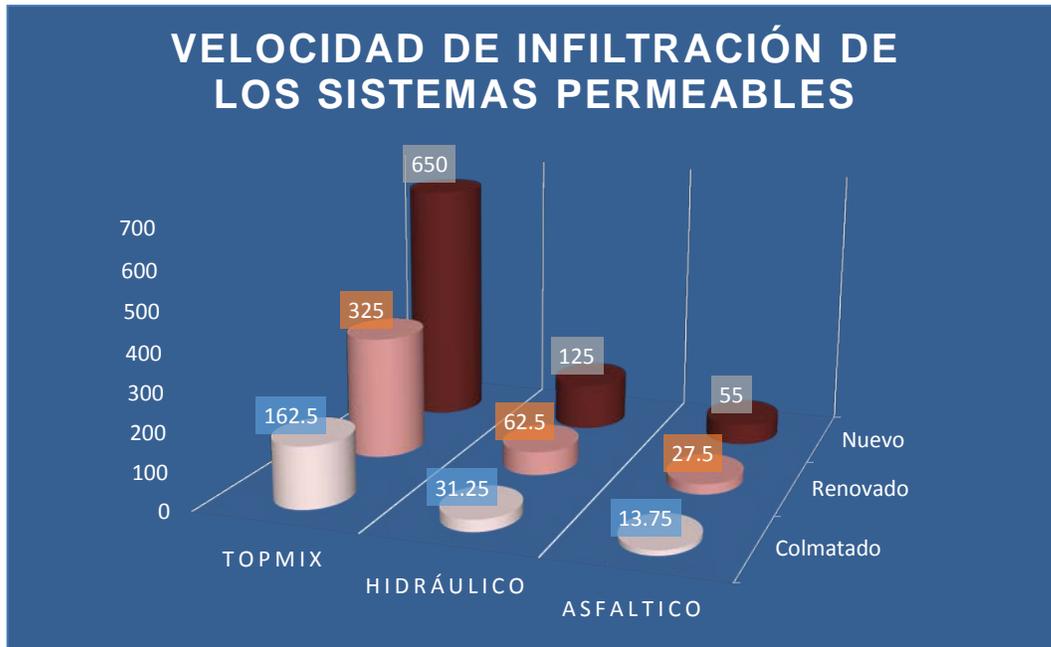
En el desarrollo de esta investigación se propusieron tres diferentes sistemas constructivos para satisfacer una sola necesidad, es decir que en base a su eficiencia será elegida la mejor opción.

En el caso del concreto hidráulico, el instituto estadounidense del concreto (ACI, por sus siglas en inglés) en su norma ACI-522R-10, compuesto por cemento Portland con mayoría casi exclusiva de agregado grueso por consiguiente poco o nulo, agregados finos, aditivos y agua, establece entre sus características: un revenimiento o asentamiento cero, contenido de vacíos de 15 %, una resistencia de diseño de 210 kg/cm<sup>2</sup> unos 3000 lb/pul<sup>2</sup>, y una velocidad de drenaje de 125,00 mm/h para una estructura nueva, 62,50 mm/h para una estructura renovada y 31,25 mm/h para una estructura totalmente colmatada, con poco mantenimiento.

En el concreto asfáltico permeable, el diseño de la mezcla es parecido al de las mezclas asfálticas estándar por lo que se utilizó el método de la AASHTO-93; pero con un 20 % de contenido de vacíos, debido a esto se utiliza menos betún y es necesario usar aditivos. La infiltración de esta mezcla será de 55 mm/h para una estructura nueva, 27,50 mm/h para una estructura renovada y 13,75 mm/h para una estructura totalmente colmatada con poco mantenimiento. Desgraciadamente esta es recomendable para tráfico lineal, pues su poca resistencia a la fricción los hace imprácticos para parqueos, vías urbanas y lagunas otras situaciones en las que se deba frenar o soportar demasiado impacto. Una solución inmediata será reducir las velocidades de circulación sobre dicha estructura.

La mezcla Topmix de la empresa británica TARMAC, cuya composición básica está compuesta de cemento tipo Portland, agregado grueso que es granito triturado y un 10 % de agregado fino compuesto por sílica, ofrece una velocidad de infiltración de 650,00 mm/h para una estructura nueva, 325 mm/h para una estructura renovada y 162,50 mm/h para una estructura totalmente colmatada con poco mantenimiento. Con un porcentaje de vacíos de 30 % comparada con la mezcla estándar, da un alto grado de resistencia a la fricción de 2 500 lb/pul<sup>2</sup>, lo que lo hace realmente bueno para parqueos, encaminamientos, vías urbanas y hasta para subbase de carpeta asfáltica. El agua que entra en contacto con este concreto se almacena bajo dicha capa (volumen de almacenamiento) hasta que comienza a evaporarse, ayudando así a mantener el agua en reposo para propiciar así también la infiltración.

Figura 51. **Velocidad de infiltración de los sistemas permeables**

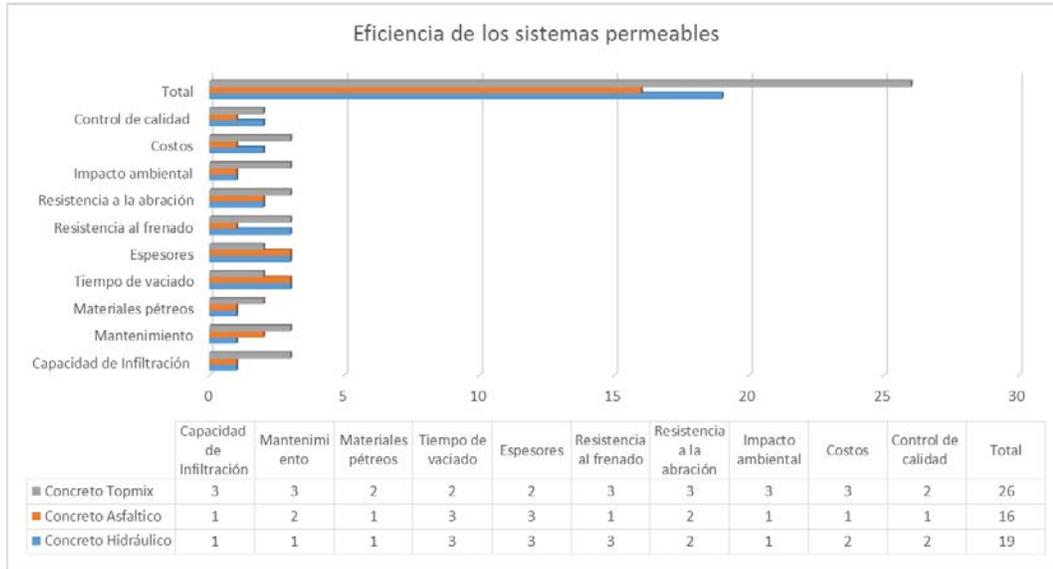


Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

### 5.3.3. Eficiencia

La eficiencia será analizada desde diferentes perspectivas para determinar el mejor sistema de diseño final para nuestra estructura, para lo cual se elaboró una matriz básica para determinar la mejor opción con respecto a las variantes más relevantes para un concreto permeable. De acuerdo con la gráfica 52, donde se le ha otorgado un valor de 1,00 para condiciones malas, 2,00 para condiciones buenas y 3,00 para excelentes, se determinó que la que la mejor eficiencia que está por arriba de los diseños convencionales de concretos porosos es el Topmix.

Figura 52. **Matriz para la determinación de la eficiencia del sistema**



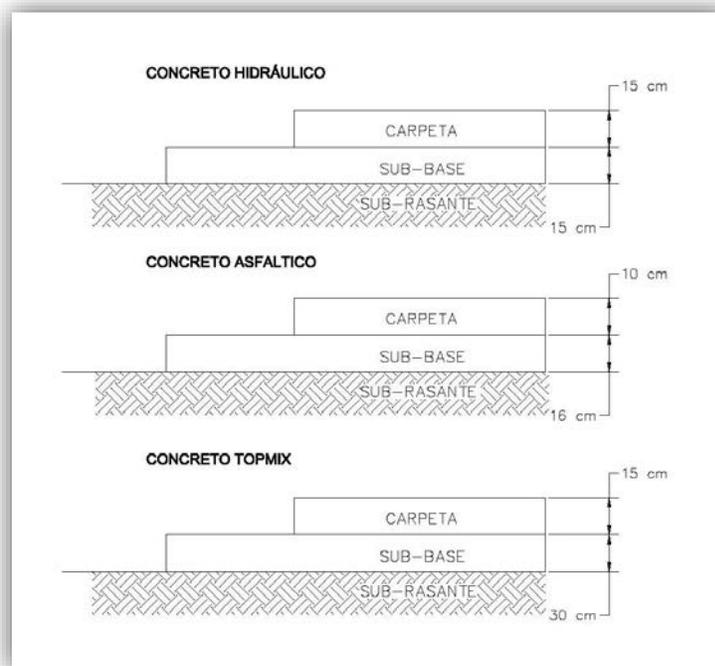
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

El sistema Topmix, por poseer valores de infiltración por arriba de la tormenta máxima de diseño (tormenta a 24,00 horas con periodo de retorno de 25 años) presenta condiciones excelentes de funcionamiento. Incluso si la estructura estuviera en su máxima colmatación, seguiría siendo la opción más idónea para el sistema que se quiere implementar. También como parte de las medidas de mitigación para el impacto ambiental, a través del PGA (Programa de gestión ambiental) este no alterará el ciclo hidrológico natural, ya que sus propiedades filtrantes hacen que el total de precipitación sobre la estructura siga su curso normal.

En cuanto a los agregados pétreos que conformaran la estructura (granito triturado como agregado grueso y un pequeño porcentaje de agregado fino que lo conformará la silica) será tomada de la región, según el mapa presentado en

la figura 19 se pueden ubicar los depósitos de granito delimitados por la geología del el área de interés.

Figura 53. **Espesores de diseño de pavimentos porosos**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Con el fin de asegurar un avance en las nuevas propuestas para soluciones constructivas en las adaptaciones a los diseños originales a la zona en estudio, es necesario comparar los espesores obtenidos mediante dos escenarios (metodologías originales y metodologías adaptadas). Las originales serán las del pavimento poroso de concreto hidráulico y la del pavimento poroso de concreto asfáltico ya que cada una cuenta con procedimientos normados para cada uno de los materiales. Al concreto Topmix lo definiremos como una metodología adaptada, ya que si bien el fabricante proporciona la misma metodología de la

AASHTO-93, es una adaptación de esta, variando en los agregados y en el control de calidad en la colocación del mismo.



## CONCLUSIONES

1. En el concreto asfáltico permeable, por medio del método de la AASHTO-93 con un 20 %, presentará tasas de infiltración de 13,75 mm/h. Desafortunadamente son recomendables para tráfico lineal, pues su poca resistencia a la fricción los hace imprácticos para parqueos y vías urbanas
2. Para las condiciones climáticas del proyecto minero Progreso VII Derivada, donde la relación evapotranspiración- precipitación es igual a 1,00. El volumen de precipitación es el mismo para la evaporación en tormentas de baja intensidad y baja recurrencia, provocada en gran parte por las altas temperaturas de la región, lo cual hace que estructuras de concreto, como las de cemento Portland, estén expuestas a altos valores de dilatación y contracción.
3. El sistema Topmix posee valores de infiltración por arriba de la tormenta máxima de diseño (tormenta a 24,00 horas con periodo de retorno de 25 años) presenta condiciones excelentes de funcionamiento, aun si la estructura estuviera en su máxima colmatación, seguiría siendo la opción más idónea para el sistema que se quiere implementar
4. El Plan de Gestión Ambiental, una extensión del estudio de impacto ambiental aprobado para el proyecto minero Progreso VII Derivada, estipula parámetros para la mitigación ambiental, como las del control de escorrentías, mismas que a través de la implementación del Topmix satisface dos grandes necesidades: construir una estructura necesaria para la infraestructura de dicho proyecto con el menor impacto a la región.

5. El diseño final de la estructura tendrá un sistema de infiltración total, ya que los valores de infiltración de la subrasante versus los volúmenes de precipitación total hacen que el suelo sea capaz de infiltrar este volumen, por lo que no requerirá un sistema de evacuación de excesos de humedad.
  
6. El sistema permeable Topmix, por estar compuesto de granito como agregado dentro de su composición, presenta excelentes valores de resistencia al impacto dados por el grado de dureza de este material.

## RECOMENDACIONES

1. Las capacidades filtrantes de un pavimento permeable se ven afectados por la calidad del agua y la capacidad de transporte del viento. En zonas donde la calidad del agua presenta índices de sólidos suspendidos arriba de los parámetros permisibles presentaran colmatación prematura, por lo que necesitará más mantenimiento de lo previsto.
2. El pavimento poroso de concreto asfáltico presenta malas condiciones para la fuerza de impacto provocada por el frenado, ya que su uso es para tráfico lineal. Por tal motivo, es ideal colocar en estructuras delimitadores de velocidad para prolongar la vida útil de la estructura y minimizar el impacto.
3. Al implementar Topmix como una solución al drenaje pluvial es importante comparar la relación costo beneficio final de toda la estructura, ya que por la utilización de granito triturado eleva los costes finales de la obras.
4. Las estructuras de Topmix son ideales para diseños de infiltración cero como para infiltración total. La selección del sistema dependerá de las características existentes de la subrasante, así también los usos posteriores que se le quiera dar al volumen total precipitado.
5. Las estructuras de Topmix son ideales como soluciones inmediatas a las inundaciones en zonas urbanas.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AIASSA, Gonzalo; ARRÚA, Pedro. *Diseño de mezclas de suelo compactado para la construcción de terraplenes*. Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia. Colombia: 2007. 11 p.
2. ALVARES MANILLA, Alfonso, VALADEZ CASTRO, Juan Pablo; MARTINEZ PENA, Guadalupe. *La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes. Aplicación en la infraestructura del transporte*. México: 2002. 89 p.
3. BARAHONA AÑAZCO, Jaime. *Análisis y diseño para solución de aguas lluvias mediante sistemas urbanos de drenaje sostenible aplicando la técnica de firmes permeables en condominio ercilla, comuna de temuco, IX región de la araucanía*. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Universidad Austral de Chile, Chile, 2014. 240 p.
4. CASTRO ESPINOSA, Mario Leandro. *Pavimentos permeables como alternativa al drenaje urbano*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2011. 90 p.
5. CASTILLO, Liz Marcia; TRUJILLO DE LA CRUZ, Erideth. *Elaboración de concreto permeable con adición de material plástico reciclado para pavimentación en el distrito de pariacoto-ancash*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad Nacional del Santa, Perú. 2009. 350 p.

6. COBOS, Carlos Roberto. *Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica*. Honduras: GWP Centroamérica. 2015. 102 p.
7. Comisión Guatemalteca de Normas Ministeriales de Economía. *Norma Técnica Guatemalteca, Agregados para Concreto. Especificaciones*. Guatemala: NTG, 2019.
8. Exploraciones de mineras de Guatemala, S. A. *Estudio de impacto ambiental del proyecto minero Progreso VII Derivada*. Guatemala. 2010, 980 p.
9. Geosistemas Pavco. *Manual de diseño con geosintéticos*. 9a ed. Colombia: Norte Grafico, 2012. 642 p.
10. Instituto Mexicano del Transporte. *Pavimentos flexibles, problemática, metodología de diseño y tendencias*. México: 1998. 145 p.
11. Instituto nacional de hidrología, meteorología y estudios ambientales. *Estudio nacional del agua*. Bogotá, Colombia: 2010. 421 p.
12. INSIVUMEH. *Atlas geográfico nacional*. [en línea]. <[http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS\\_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas\\_hidro.htm](http://www.insivumeh.gob.gt/hidrologia/ATLAS_HIDROMETEOROLOGICO/Atlas_hidro.htm)>. Consulta: 25 de febrero de 2021.
13. LOPEZ RAMIREZ, Randy Sujey. *Fabricación de adoquín con adición de escoria de mata de níquel como agregado fino*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006. 123 p.

14. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. *Especificaciones Generales Para Construcción de Carreteras y Puentes*. Guatemala: CIV, 2001. 724 p.
15. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. *Mapa de cuencas hidrológicas a escala 1:50 000*. Guatemala: MAGA, 2009. 64 p.
16. Ministerio de Energía y Minas. *Ministerio de energía y Minas. Clasificación minera en Guatemala*. Guatemala: MEM, 2005. 55 p.
17. Ministerio de Salud del Gobierno del El Salvador. *Propuesta de reglamento técnico salvadoreño para el diseño y construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales de tipo ordinario para la zona rural*. El Salvador: 2015. 42 p.
18. PAREDES GARRIDO, Deéner Olaví. *Evaluación de una losa de concreto permeable vaciada in situ, para su aplicación en la construcción de pavimentos rígidos en la ciudad de Cajamarca*. Trabajo de graduación de ingeniería civil, Facultad de ingeniera, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú: 2018. 174 p.
19. POLANCO ANDRADE, Ángela María. SANCHEZ VEGA, Ángela María. *Diseño hidráulico de losas en pavimento poroso rígido como estructuras complementarias al drenaje pluvial de Bogotá*. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá: 2012. 151 p.
20. LOPÉZ RAMÍREZ, Randy Sujey. *Fabricación de adoquín con adición de escoria de mata de níquel como agregado fino*. Trabajo de

graduación de Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala: 2016. 123 p.

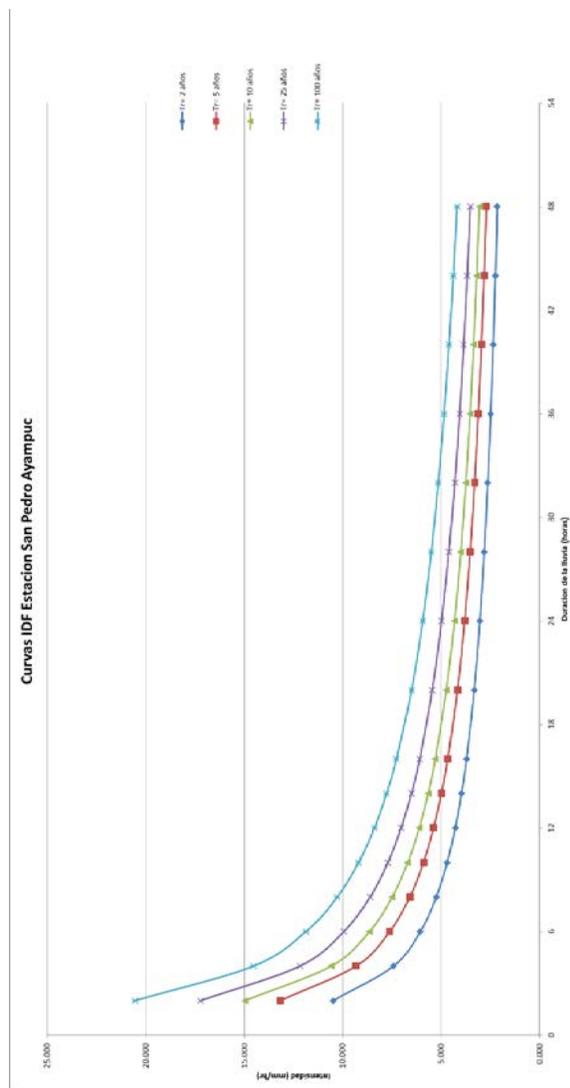
21. REDONDO POLANCO, Ledys. ZUÑIGA PÁEZ, Luis Fernando. *Principales variables para el diseño y la construcción de pavimentos permeables para su control en origen de la escorrentía urbana*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena, Colombia: 2016. 55 p.
22. Tarmac. *Technical information Topmix permeable*. Londres Inglaterra: 2015. 5 p.
23. Tarmac. *Permeable concrete, solución guide*. Londres Inglaterra: 2015. 30 p.
24. SAUBES, Nils. *Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala*. Trabajo de graduación. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar, Guatemala: 2015. 81 p.
25. Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT. *La permeabilidad de los suelos en los problemas de transporte de contaminantes. Aplicación en la infraestructura del transporte*. México: 2002. 89 p.
26. Sociedad Geográfica de Lima. *¿Qué es cuenca hidrológica?* Lima, Perú: 2011. 44 p.
27. Universidad mayor de San Simón. *Libro de pavimentos*. Facultad de ciencias y tecnología. Bolivia: s.f. 461 p.

28. UNTIVEROS, Carlos Aire. *Experiencias concretas. Tecnología para El Concreto*. Lima, Perú: 2019. 9 p.
29. YAGUE, Juan Luis. *Aguas Subterráneas*. España: s.f. 78 p.
30. ZAMBRANO MEDRANO, Byron Aladin; DELGADO GUTIERREZ, Daniel Alfredo; ORTIZ HERNANDEZ, Eduardo Humberto; JALIL PONCE, Jorge Eduardo. *Mezclas asfálticas drenantes y su aplicación en las carreteras de Manabí*. 1a ed. Guayaquil Ecuador: 2020. 51 p.



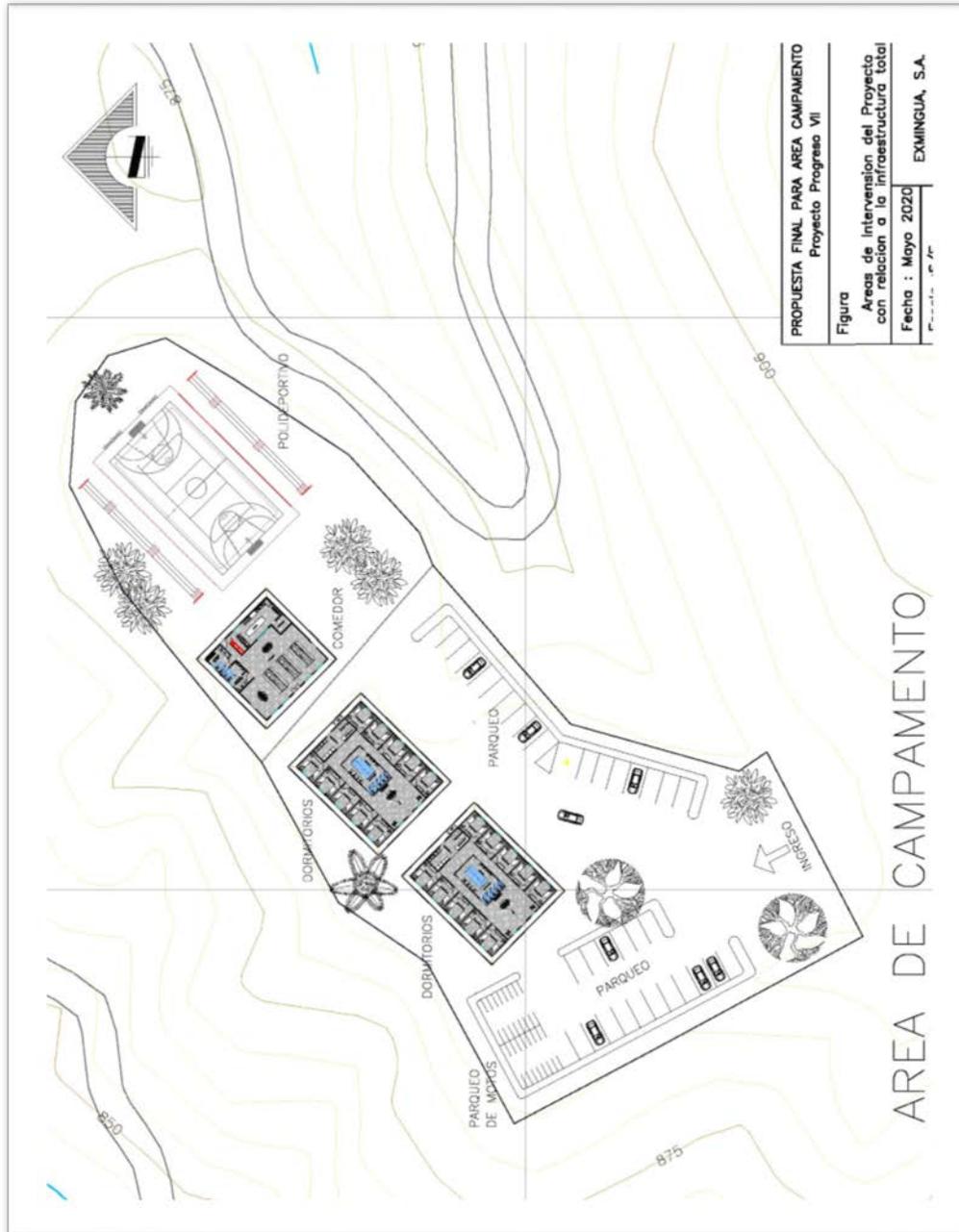
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Curvas intensidad duración frecuencia de la estación hidrométrica de San Pedro Ayampuc



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Apéndice 2. **Modelo arquitectónico para la construcción de parques denominada “Campamento”**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Apéndice 3. **Tasas de infiltración realizadas en el proyecto Progreso**

**VII Derivada**

**Punto 1**

<b>Intervalo de tiempo (min)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Descenso (cm)</b>	<b>Tasa de Infiltración min/cm</b>	<b>Tasa de Infiltración lt/m2/dia</b>
0-30	30	6,40	4,69	59,03
30-60	30	5,80	5,17	56,19
60-90	30	5,55	5,41	54,97
90-120	30	5,10	5,88	52,69
120-150	30	4,80	6,25	51,12
150-180	30	4,25	7,06	48,10
180-210	30	4,10	7,32	47,25
210-240	30	3,95	7,59	46,37

**Punto 2**

<b>Intervalo de tiempo (min)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Descenso (cm)</b>	<b>Tasa de Infiltración min/cm</b>	<b>Tasa de Infiltración lt/m2/dia</b>
0-30	30	4,80	6,25	51,12
30-60	30	4,30	6,98	48,38
60-90	30	4,15	7,23	47,53
90-120	30	3,70	8,11	44,88
120-150	30	3,35	8,96	42,71
150-180	30	3,05	9,84	40,75
180-210	30	2,95	10,17	40,08
210-240	30	2,70	11,11	38,34

**Punto 3**

<b>Intervalo de tiempo (min)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Descenso (cm)</b>	<b>Tasa de Infiltración min/cm</b>	<b>Tasa de Infiltración lt/m2/dia</b>
0-30	30	8,30	3,61	67,22
30-60	30	7,20	4,17	62,61
60-90	30	7,00	4,29	61,73
90-120	30	6,80	4,41	60,84
120-150	30	6,50	4,62	59,49
150-180	30	6,35	4,72	58,80
180-210	30	6,15	4,88	57,86
210-240	30	6,05	4,96	57,39

Continuación del apéndice 3.

**Punto 4**

<b>Intervalo de tiempo (min)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Descenso (cm)</b>	<b>Tasa de Infiltración min/cm</b>	<b>Tasa de Infiltración lt/m2/dia</b>
0-30	30	7,40	4,05	63,47
30-60	30	6,30	4,76	58,57
60-90	30	5,90	5,08	56,68
90-120	30	5,60	5,36	55,22
120-150	30	5,50	5,45	54,72
150-180	30	5,20	5,77	53,21
180-210	30	5,10	5,88	52,69
210-240	30	4,60	6,52	50,04

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

## ANEXOS

### Anexo 1. Análisis físico de suelos para el área de interés



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
LABORATORIO DE SUELO-PLANTA-AGUA "SALVADOR CASTILLO ORELLANA"



814

**INTERESADO: TOMAS PADILLA**  
**PROCEDENCIA: SAN JOSE DEL GOLFO, GUATEMALA**  
**FECHA DE INGRESO: 1/10/09**

**ANALISIS FISICO**

IDENTIFICACION	gr/cc Da	% HUMEDAD		% CLASE TEXTURAL			
		1/3	15	Arcilla	Limo	Arena	
PLANTA DE PROCESAMIENTO	0.9524	26.98	17.48	36.41	16.42	47.16	ARCILLO ARENOSO
PILA DE COLA	1.0526	17.04	10.38	25.91	22.72	51.36	FRANCO ARCILLO ARENOSO
LA CHOLEÑA	1.0256	23.79	15.69	34.31	22.72	42.96	FRANCO ARCILLOSO
EL TUNEL	1.3333	19.26	9.51	23.81	24.82	51.36	FRANCO ARCILLO ARENOSO



CAMPUS CENTRAL, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
 EDIFICIO T-8, SEGUNDO NIVEL, OFICINA B-9, CIUDAD UNIVERSITARIA, ZONA 12, GUATEMALA.  
 CÓDIGO POSTAL 01012. APARTADO POSTAL 1545. TEL.: (502) 2443 9500, EXTENSION: 1768. FAX: (502) 2476 9758.

Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p. 680.

Anexo 2. Ensayo proctor modificado para el área de interés

**SERVICIOS DE INGENIERÍA "EL PILAR"**

1a CALLE 1-45 ZONA 4, LA ESPERANZA, QUETZALTENANGO  
TELÉFONOS: 5918-1682, 7772-0817, FAX 7772-0835

No. DE LABORATORIO: 03-10. MATERIAL DE: SUELO NATURAL  
PROYECTO: PROGRESO VII  
SOLICITADO POR: EXMINGUA, S.A.  
PROCEDENCIA DEL MATERIAL: DEL PROYECTO

**INFORME DE ESTUDIO DE PROCTOR MODIFICADO**  
AASHTO T-180

P.B.	TARA	P.N.	P.U.H.	TARRO	TARA	P.B.H.	P.B.S.	DIF.	P.N.S.	% H.	PROM. HUM	P.U.S.
13.26	9.25	4.01	120.30		99.50	223.20	219.00	4.20	119.50	3.51	3.51	116.22
13.60	9.25	4.35	130.50		99.30	217.60	210.50	7.10	111.20	6.38	6.38	122.67
13.92	9.25	4.67	140.10		98.30	214.90	205.00	9.90	106.70	9.28	9.28	128.20
14.04	9.25	4.79	143.70		99.50	228.40	214.00	14.40	114.50	12.58	12.58	127.65
13.85	9.25	4.60	138.00		99.30	215.40	199.70	15.70	100.40	15.64	15.64	119.34

<b>CLASIFICACIÓN DEL SUELO</b> ARCILLA LIMOSA CON PIEDRA  No. DE CILINDRO 1 CANTIDAD DE MATERIAL VOL. DEL CILINDRO 0.033333 CANTIDAD DE AGUA INICIAL SEGUIDO CON 130 CC OPERADOR: ING. ENRIQUE BARRIOS FECHA 22/feb/2010 OBSERVACIONES  REVISÓ: ING. ENRIQUE BARRIOS M.	P.U.S. MAX. = 128.80 LB/PIE <sup>3</sup> P.U.S. MAX. = 2,062.83 KG/M <sup>3</sup> % HUMEDAD ÓPTIMA = 10.80%

*Ing. Enrique Barrios Montes*  
INGENIERÍA EL PILAR  
CALLE 1-45

*Ing. Enrique Barrios Montes*  
**ING. JOSÉ ENRIQUE BARRIOS MONTES**  
GERENTE GENERAL  
SERVICIOS DE INGENIERÍA EL PILAR

SERVICIOS DE INGENIERÍA EL PILAR  
Ing. Enrique Barrios Montes  
Quetzaltenango.

Fuente: EXMINGUA. Estudio de impacto ambiental. p. 741.

Anexo 3. Ensayo de granulometría para el área de interés

**SERVICIOS DE INGENIERÍA "EL PILAR"**

1a CALLE 1-45 ZONA 4, LA ESPERANZA, QUETZALTENANGO  
TELEFONOS: 5918-1682, 7772-0817, FAX 7772-0835

MATERIAL DE: SUELO NATURAL  
FECHA: 22/02/2010

No. DE LABORATORIO: 03-10.  
PROGRESO VII  
SOLICITADO POR: EXMINGUA, S.A.  
PROCEDENCIA DEL MATERIAL: DEL PROYECTO

**INFORME DE ESTUDIO DE GRANULOMETRÍA Y LÍMITES DE ATTENBERG**

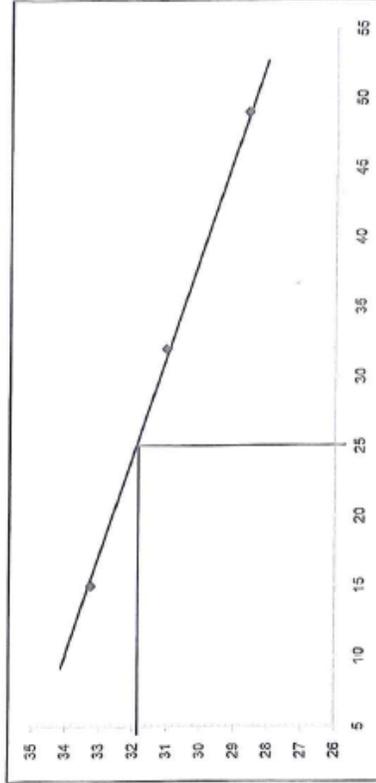
TAMIZ	P.B.R.	TARA	P.M.R	% RET	% PASA	T.P.
3"						
2 1/2"						
2"	301.4	301.4	0.0	0.00	100.00	
1 1/2"	475.9	301.4	175.5	17.13	82.87	
1"	475.9	301.4	175.5	17.13	82.87	
3/4"	516.9	301.4	215.5	21.04	78.96	
3/8"	604.4	301.4	303.0	28.58	70.42	
No. 4	656.3	301.4	354.9	34.64	65.36	
No. 10	746.0	301.4	444.6	43.40	56.60	
No. 40	912.2	301.4	610.8	59.53	40.37	
No. 100	960.0	301.4	668.6	67.22	32.78	
No. 200	1,036.9	301.4	735.5	71.80	28.20	

GRANULOMETRÍA FINA  
P.B.: 1,325.8  
TARA: 301.4  
P.N.: 1,024.4

GRANULOMETRÍA GRUESA  
P.B.  
TARA  
P.N.

**OBSERVACIONES**

**ARCILLA LIMOSA CON PIEDRA**



TARRO	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO			ÍNDICE DE PLASTICIDAD		
	1	2	3	TARRO	1	2	3	LL	LI
TARRO	41.97	40.60	40.93	PBH	23.71			22.96	20.06
PBH	36.77	35.36	35.35	PBS	22.90			22.25	11.79
PBS	18.60	18.48	18.57	TARA	18.79			18.77	
TARA	5.20	5.24	5.58	DIF.	0.81			0.71	
DIF.	18.17	16.36	16.78	PNS	4.11			Humedad Natural	10.04
PNS	28.62	31.04	33.25	% Humedad	19.71			20.40	
% Humedad	43	32	15	% PRDM	20.06				
No. Gógrafos									

*José Enrique Barrios Montes*  
INGENIERO CIVIL  
Oct. 4, 1975

AVG. JOSÉ ENRIQUE BARRIOS MONTES  
GERENTE GENERAL  
SERVICIOS DE INGENIERÍA EL PILAR

SERVICIOS DE INGENIERÍA EL PILAR  
Ing. Enrique Barrios Montes  
Quetzaltenango.

Fuente: EXMINGUA. Estudio de impacto ambiental. p. 741.

Anexo 4. **Ensayo de corte directo no drenado no consolidado para el área de interés**

**SERVICIOS DE INGENIERÍA "EL PILAR"**

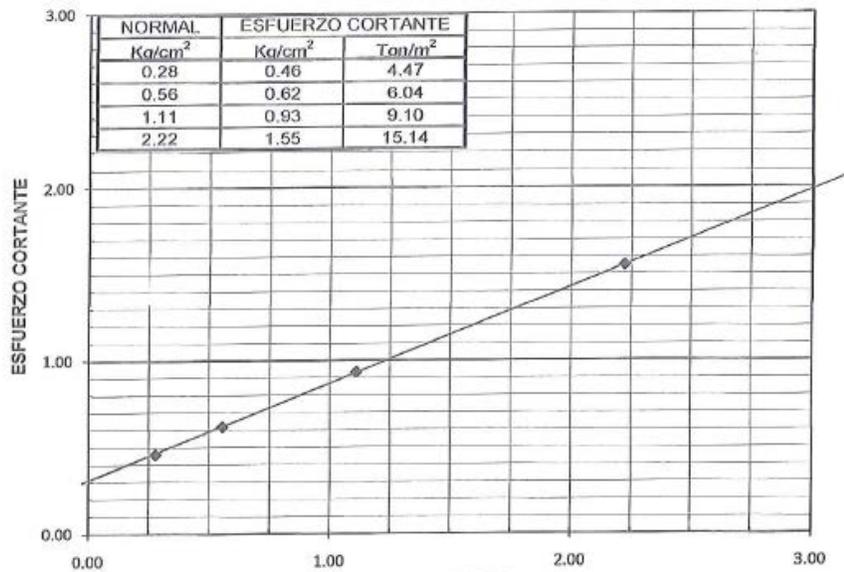
1a CALLE 1-45 ZONA 4, LA ESPERANZA, QUETZALTENANGO  
TELÉFONOS: 5918-1682, 7772-0817, FAX 7772-0835

No. DE LABORATORIO: 03-10.  
PROYECTO: PROGRESO VII  
SOLICITADO POR: EXMINGUA, S.A.  
PROCEDENCIA DEL MATERIAL: DEL PROYECTO  
MATERIAL DE: SUELO NATURAL

**INFORME DE ESTUDIO DE CORTE DIRECTO NO DRENADO NO CONSOLIDADO**

FECHA	PERFORACIÓN No.	MUESTRA No.	PROFUNDIDAD (m)	CONTENIDO DE HUMEDAD	DENSIDAD HUMEDA (Kg/m <sup>3</sup> )	COHESIÓN (Kg/cm <sup>2</sup> )	φ(°)
22/02/2010	---	3		10.04	1,582.03	0.31	29.25°

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA ARCILLA LIMOSA CON PIEDRA  
ÚLTIMA RESISTENCIA DEL SUELO  
VALOR SOPORTE MÁXIMO DE DISEÑO



PRESIÓN NORMAL

  
**ING. JOSÉ ENRIQUE BARRIOS MONTES**  
 GERENTE GENERAL  
 SERVICIOS DE INGENIERÍA EL PILAR

SERVICIOS DE INGENIERÍA EL PILAR  
 Ing. Enrique Barrios Montes  
 Quetzaltenango.

Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p. 742.

Anexo 5. Ensayo de gravedad específica para el área de interés

**SERVICIOS DE INGENIERÍA "EL PILAR"**

1a CALLE 1-45 ZONA 4, LA ESPERANZA, QUETZALTENANGO  
TELÉFONOS: 5918-1682, 7772-0817, FAX 7772-0835

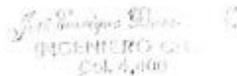
No. DE LABORATORIO: 03-10. FECHA: 22/02/2010  
PROYECTO: PROGRESO VII  
SOLICITADO POR: EXMINGUA, S.A.  
PROCEDENCIA DEL MATERIAL: DEL PROYECTO  
MATERIAL DE: SUELO NATURAL

**INFORME DE ESTUDIO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA**

$P_{\text{SUELO}}$	$P_{\text{MATRAZ, AGUA}}$	$P_{\text{MATRAZ, AGUA, SUELO}}$
100.00	1,391.80	1,453.80
	$G_{\text{ESP}} =$	2.63

  
ING. JOSÉ ENRIQUE BARRIOS MONTES  
GERENTE GENERAL  
SERVICIOS DE INGENIERÍA EL PILAR

SERVICIOS DE INGENIERÍA EL PILAR  
Ing. Enrique Barrios Montes  
Quetzaltenango.

  
INGENIERÍA EL PILAR  
Col. 4, 100

Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p. 743.

## Anexo 4. Datos de permeabilidad del suelo en el área de interés

### BALANCE HIDRICO DE SUELOS

**Zona de Estudio:** Presa de cola  
**Fecha:** 2009

**Textura de Suelo:** Franco Arcillo Arenoso

**Simbología**

I: Capacidad de Infiltración.

CC: Capacidad de Campo.

PM: Punto de Marchitez.

PR: Profundidad de Raíces.

RAD (CC-PM): Rango de Agua Disponible.

P: Precipitación Mensual.

PI: Precipitación que Infiltra.

ESC: Escorrentía Superficial

ETP: Evapotranspiración Potencial.

ETR: Evapotranspiración Real.

HSI: Humedad de Suelo Inicial.

HD: Humedad Disponible

HSF: Humedad de Suelo Final.

DCC: Déficit de Capacidad de Campo.

DS: Densidad de Suelo.

Rp: Recarga Potencial

NR: Necesidad de Riego.

fc (mm/d): 98.40

I (%): 0.4654097

DS (g/cm3): 1.05

PR (mm): 500.00

HSi (mm): 89.68

(%)

17.04

10.38

6.66

0.41

(mm)

89.68

54.63

35.05

CC

PM

RAD

I (cm/h)

Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	4.00	1.90	4.50	69.50	112.70	215.10	147.30	135.40	260.30	156.30	35.40	21.80	1164.20
PI (mm)	1.86	0.88	2.09	32.35	52.45	100.11	68.55	63.02	121.15	72.74	16.48	10.15	541.83
ESC (mm)	2.14	1.02	2.41	37.15	60.25	114.99	78.75	72.38	139.15	83.56	18.92	11.65	622.37
ETP (mm)	47.30	54.40	63.20	70.20	73.20	71.70	70.10	69.00	64.20	57.60	49.30	44.70	734.90
HSI (mm)	89.68	70.34	61.13	57.70	66.42	75.43	89.68	89.17	87.49	89.68	89.68	76.04	
HD (mm)	36.91	16.60	8.60	35.41	64.25	120.91	103.61	97.55	154.01	107.80	51.53	31.56	
ETR (mm)	21.20	10.09	5.53	23.62	43.44	71.70	69.07	64.69	64.20	57.60	30.12	17.69	
HSF (mm)	70.34	61.13	57.70	66.42	75.43	89.68	89.17	87.49	89.68	89.68	76.04	68.50	
DCC (mm)	19.34	28.55	31.98	23.26	14.25	0.00	0.52	2.19	0.00	0.00	13.64	21.18	
Rp (mm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.16	0.00	0.00	54.76	15.14	0.00	0.00	84.06
NR (mm)	45.44	72.86	89.65	69.84	44.01	0.00	1.55	6.50	0.00	0.00	32.82	48.19	410.86

Fuente: EXMINGUA. *Estudio de impacto ambiental*. p. 780.

## Anexo 5. Estudio de calidad del agua

817



2a. Calle "B" 35-91, Zona 11 Col. Utatlán II  
 PBX: 2438-3108  
 Fax: 2439-8663  
 www.ecoquimsa.com.gt  
 E-mail: Ventas@ecoquimsa.com.gt

### INFORME DE RESULTADOS DE ANALISIS

#### Datos del Cliente

Ciente: Grupo Sierra Madre, S.A.  
 Responsable: Ing. Everson Ordóñez  
 Dirección: 3a. Avenida 17-53 Zona 14

#### Datos de la muestra

Lugar de muestreo: San José del Golfo Muestra simple o compuesta: Simple  
 Referencia cliente: Pozo del Coyote QSW-01 Responsable del muestreo: CLIENTE  
 Fecha de monitoreo: 10 de septiembre de 2009 Temperatura de almacenaje: 5 °C  
 Hora de monitoreo: 15:00 Recipiente utilizado: Plástico  
 Tipo de muestra: Agua de río Ubicación: N 1635218  
 Código de muestra: 09-4575-6 W 781378  
 Lote: 09-4575

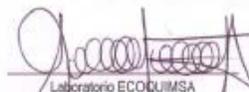
#### Datos de Laboratorio

Fecha de recepción de la muestra por el laboratorio: 11 de septiembre de 2009  
 Hora de recepción de la muestra por el laboratorio: 11:17  
 Fecha de informe: 30 de septiembre de 2009

Análisis	Dimensional *	Límite de Detección	Resultados
Aluminio	mg/L - Al	0.02	0.03
Arsénico	mg/L - Sb	0.050	< 0.050
Arsénico	mg/L - As	0.0030	0.085
Boro	mg/L - B	0.10	< 0.10
Cadmio	mg/L - Cd	0.002	< 0.002
Calcio	mg/L - Ca	0.38	15.19
Cobre	mg/L - Cu	0.5	< 0.5
Cromo (VI)	mg/L - Cr	0.05	< 0.05
Hierro	mg/L - Fe	0.06	0.21
Magnesio	mg/L - Mg	0.04	12.41
Manganeso	mg/L - Mn	0.018	0.034
Mercurio	mg/L - Hg	0.003	< 0.003
Molibdeno	mg/L - Mo	0.010	< 0.010
Níquel	mg/L - Ni	0.5	0.01
Plomo	mg/L - Pb	0.10	< 0.10
Potasio	mg/L - K	0.2	8.1
Selenio	mg/L - Se	0.010	< 0.010
Silicio	mg/L - Si	0.05	27.9
Sodio	mg/L - Na	1.0	38.7
Vanadio	mg/L - V	0.010	0.013
Zinc	mg/L - Zn	0.05	0.05

\* mg/L = ppm

Los presentes resultados son válidos únicamente para la muestra tomada y recibida en la fecha indicada.  
 Metodología utilizada: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21th Edition 2005.

  
 Laboratorio ECOQUIMSA  
 Lda. Marlène Soto  
 Química Farmacéutica  
 Colegiado No. 2511

