



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

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

**TEMA: “EVALUACIÓN FUNCIONAL Y ESTRUCTURAL DE
PAVIMENTOS FLEXIBLES MEDIANTE TECNOLOGÍA TERMOGRÁFICA
Y MÉTODO UAV”**

AUTOR: NACEVILLA TOAQUIZA, LUIS JONATAN

DIRECTOR: ING. MORALES MUÑOZ, BYRON OMAR MSC.

SANGOLQUÍ

2018

CERTIFICACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación "Evaluación Funcional y Estructural de Pavimentos Flexibles Mediante Tecnología Termográfica y Método UAV", fue realizado por el señor **Nacevilla Toaquiza, Luis Jonatan** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 15 de agosto del 2018



Ing. Byron Omar Morales Muñoz

C.C 1712565900

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIRÍA CIVIL****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Nacevilla Toaquiza, Luis Jonatan**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "Evaluación Funcional y Estructural de Pavimentos Flexibles Mediante Tecnología Termográfica y Método UAV" es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 9 de agosto del 2018



Luis Jonatan Nacevilla Toaquiza
C.C: 1724610603

AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **Luis Jonatan Nacevilla Toaquiza**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar el trabajo de titulación "Evaluación Funcional y Estructural de Pavimentos Flexibles Mediante Tecnología Termográfica y Método UAV" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 9 de agosto del 2018



Luis Jonatan Nacevilla Toaquiza
C.C: 1724610603

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mi familia y amigos.

A mi familia por ser el pilar fundamental en mi formación personal, por enseñarme que las mejores recompensas tardan, pero no se olvidan, por darme el cariño y la comprensión para nunca rendirme. Por ser el mejor ejemplo que he tenido, por todo el esfuerzo y sacrificio que tuvieron que pasar para darme el mejor regalo, mi educación.

A mi mamá por ser incondicional, y demostrarme su cariño todas las noches en vela que pasábamos junto, por ser parte fundamental en mi crecimiento, demostrándome que los problemas no son impedimento alguno para llegar a la cima.

A mi papá por enseñarme que hay que sacrificarse para lograr nuestras metas, por darme carácter, por enseñarme que ser responsable y respetuoso son las características de un caballero.

A mis hermanas y a mi hermano por ser incondicionales, por siempre estar a mi lado alentándome, regalándome momentos de alegría que nunca olvidare, por las locuras que vivimos juntos, porque al final del día sé que ellos estarán allí, esperando por mí.

A mis amigos por sus palabras de ánimo, por darme su apoyo y compartir muchos momentos que se quedaran en mi memoria.

Jonatan Nacevilla

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres porque gracias a ellos pude conseguir mi primera meta, por enseñarme que en la vida siempre vamos a seguir creciendo personal y profesionalmente, que no existen limitaciones mientras tenga la tenacidad de seguir adelante, que este no es el fin sino el inicio de mi nueva vida, a mis hermanas y hermano por darme el aliento de nunca rendirme, de motivarme para alcanzar todo lo que me proponga, por enseñarme que nuestras decisiones son las primeras en considerarlas.

A mis amigos quienes me alentaron en mi camino, quienes compartieron momentos únicos que siempre recordare.

Al ing. Byron Morales por enseñarme una visión distinta de la ingeniería, a reconocer que mientras tengamos las ganas de imaginar, desarrollar e innovar, no existen limitaciones.

Por ultimo quiero agradecer a quienes me enseñaron a aprender de mis errores, a quienes conocí sin imaginármelo y se volvieron parte fundamental de mi crecimiento personal.

Jonatan Nacevilla

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN PARA LA PUBLICACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xviii
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT.....	xx
CAPITULO I	1
1 Generalidades	1
1.1 Antecedentes	1
1.1 Identificación del problema.....	2
1.2 Justificación e importancia	4
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Metas.....	5
CAPITULO II	6
2 Marco teórico	6
2.1 Pavimento	6
2.1 Pavimento flexible	6
2.1.1 Definición de desempeño del pavimento	7
2.1.2 Indicadores de comportamiento:.....	8
2.2 Carpeta asfáltica características y patologías	8
2.2.1 Fisuras	9
2.2.1.1 Fisuras longitudinales y transversales (FL, FT).....	9

2.2.1.2	Fisuras por reflexión de juntas o grietas en placas de concreto (FJL o FJT)	11
2.2.1.3	Fisuras en media luna (FML)	12
2.2.1.4	Fisura de borde (FB)	13
2.2.1.5	Fisura de bloque (FBL)	14
2.2.1.6	Piel de cocodrilo (PC)	15
2.2.2	Deformaciones	17
2.2.2.1	Abultamiento (AB)	17
2.2.2.2	Hundimiento (HUN)	18
2.2.2.3	Ahuellamiento (AHU)	19
2.2.3	Pérdidas de las capas de la estructura	20
2.2.3.1	Descascaramiento (DC)	20
2.2.3.2	Baches (BCH)	21
2.2.4	Daños Superficiales	22
2.2.4.1	Desgaste superficial (DSU)	22
2.2.5	Pérdidas de las capas de la estructura	23
2.2.5.1	Afloraciones de agua (AFA)	24
2.3	Evaluación estructural de pavimento flexible en zona de estudio	24
2.3.1	Subrasante	25
2.3.2	Subbase granular	25
2.3.3	Base granular	28
2.3.4	Carpeta de rodadura	31
2.4	Evaluación funcional de pavimento flexible en zona de estudio	31
2.4.1	Reología de pavimentos	31
2.4.2	Patologías en condiciones de variación climática	32
2.4.2.1	Fisuraciones en condiciones de temperatura variable	33
2.4.2.2	Deformaciones permanentes a temperatura variable	34
2.4.3	Índice de Serviciabilidad	34
2.4.3.1	Pérdida o disminución del índice de serviciabilidad	36
2.5	Estudio de tráfico	37
2.5.1	Tráfico promedio diario anual (TPDA)	38

2.5.1.1	Disposición y tipo de tráfico	38
2.5.2	Clasificación de las vías según TPDA	40
2.5.2.1	Cálculo y estimación de Tráfico Promedio Diario Anual "TPDA"	40
2.6	Diseño de mezcla asfáltica en caliente.....	42
2.6.1	Hormigón asfáltico mezcla en caliente.....	42
2.6.2	Principios y consideración para una mezcla asfáltica	45
2.6.3	Fórmula maestra de obra.....	45
2.6.4	Método Marshall para diseño de pavimentos	46
2.6.4.1	Estabilidad y flujo en pavimentos flexibles.....	48
2.7	Sistema de aeronaves no tripuladas (UAV).....	48
2.7.1	Aplicación de los sistemas de aeronaves no tripulados (UAV/UAS)	49
2.7.2	Imágenes ortodigitales.....	50
2.7.3	Aplicaciones cartográficas y desarrollo digital.....	51
2.7.3.1	Sistemas de geo posicionamiento	52
2.7.3.2	Software fotogramétrico.....	53
2.8	Espectros de radiación	54
2.8.1	Radiación solar	54
2.8.1.1	Irradiancia solar	55
2.8.2	Radiación ultravioleta.....	55
2.8.3	Sensor de radiación solar (Piranómetro)	56
2.9	Técnicas de medida termográfica.....	57
2.9.1	Emisividad	57
2.9.2	Espectro electromagnético	57
2.9.3	Cámara termográfica	58
2.10	Sistema eléctrico de monitoreo asistido.....	59
2.10.1	Redes de sensores.....	59
2.10.1.1	Aplicaciones potenciales	59
2.10.2	Sensor de temperatura	60
2.10.3	Sistema de monitorización.....	61
CAPITULO III	.....	62
3 Metodología	.....	62

3.1	Descripción del área de estudio	62
3.1	Levantamiento ortodigital mediante tecnología UAV/UAS	63
3.1.1	Características ambientales registradas	63
3.1.2	Sistema de monitorización	64
3.1.3	Puntos de control en zonas de falla	65
3.1.4	Toma de puntos de control.....	66
3.1.4.1	Método fast static	66
3.2	Medidas termográficas	68
3.2.1	Equipo termográfico “calibración”	68
3.2.1.1	Reconocimiento de patrones	68
3.2.2	Sensor CAT FLIR S60.....	69
3.2.3	Captura de videos e imágenes termográficas.....	70
3.3	Variación climática y radiación solar en zona de estudio.....	71
3.3.1	Condiciones climáticas	71
3.3.1.1	Radiación solar.....	72
3.3.1.2	Método de Angstrom.....	73
3.4	Volumen de tráfico en zona de estudio mediante “TPDA”	74
3.4.1	Tráfico diario (TD)	74
3.4.2	Tráfico promedio diario anual (TPDA).....	76
3.4.3	Proyección de trafico futuro (TF).....	77
3.4.4	ESAL de diseño	77
3.5	Evaluación funcional de pavimento flexible en zona de estudio.....	79
3.5.1	Detección de patologías estructurales	80
3.6	Evaluación estructural de pavimento flexible en zona de estudio	80
3.6.1	Caracterización de material granular	81
3.6.1.1	Subbases granulares.....	82
3.6.1.2	Bases granulares.....	82
3.6.1.3	Granulometría ASTM C136	82
3.6.1.4	Subrasante	83
3.6.1.5	Ensayo CBR (California Bearing Ratio) “ASTM D1883”	85
3.7	Diseño de mezcla asfáltica en caliente.....	86

3.7.1	Caracterización de agregados pétreos	89
3.7.1.1	Desgaste en máquina de los ángeles “Abrasión” INEN 860.....	90
3.7.1.2	Granulometría ASTM C136	92
3.7.1.3	Gravedad específica para agregado grueso INEN 857	93
3.7.1.4	Gravedad específica para agregado fino INEN 856	96
3.7.2	Caracterización física de asfalto AC-20	99
3.7.2.1	Ductilidad INEN 916/ASTM D 113	100
3.7.2.2	Penetración INEN 917/ASTM D5	102
3.7.2.3	Gravedad específica ASTM D70.....	105
3.7.2.4	Punto de inflamación ASTM D92.....	107
3.7.2.5	Punto de reblandecimiento INEN 920/ASTM D36	108
3.7.3	Caracterización mecánica de asfalto AC-20	110
3.7.3.1	Estabilidad granulométrica	110
3.7.3.2	Elaboración de briquetas ASTM D6926.....	111
3.7.3.3	Densidad específica bulk ASTM D2726.....	114
3.7.3.4	Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall ASTM D6927.....	115
3.7.3.5	Gravedad específica máxima teórica ASTM D2041	117
3.7.3.6	Análisis volumétrico de estabilidad INV E 799.....	118
3.7.3.7	Resistencia a compresión diametral mezclas bituminosas NLT 346/91	119
3.8	Sistema de Adquisición de Datos	121
3.8.1	Caracterización del sistema	122
3.8.2	Diseño de SAD	123
3.8.2.1	Etapa I: Captura de la señal física.....	123
3.8.2.2	Etapa II: Circuito de acondicionamiento	126
3.8.2.3	Etapa III: Digitalización y comunicación con PC.....	128
3.8.2.4	Etapa IV: Software de adquisición y manipulación de datos.	128
3.8.3	Mediciones.....	129
CAPITULO IV.....		130
4	Resultados y discusión.....	130
4.1	Levantamiento ortodigital mediante tecnología UAV/UAS	130
4.1.1	Reconocimiento de patologías mediante UAV/UAS.....	132

4.2	Evaluación de patologías mediante tecnología termográfica	133
4.3	Condiciones climática “Energía en función de emisividad”	134
4.3.1	Método de Angstrom	138
4.4	Análisis de tráfico “TPDA”	144
4.4.1	Proyección de tráfico futuro	146
4.4.2	Volumen horario de máxima demanda (VHMD).....	147
4.4.3	Factor de hora de máxima demanda o factor hora pico (FHMD).....	148
4.4.4	Esal de diseño	149
4.5	Evaluación funcional de pavimento flexible	150
4.5.1	Caracterización de patologías en zona de estudio	150
4.5.2	Índice de serviciabilidad	152
4.6	Evaluación estructural de pavimento flexible.....	153
4.6.1	Caracterización de material granular	155
4.6.2	Ensayo CBR (California Bearing Ratio)	156
4.7	Diseño de Mezcla Asfáltica.....	159
4.7.1	Agregados Pétreos	159
4.7.1.1	Máquina de los ángeles “Abrasión”	159
4.7.1.2	Curva granulométrica estabilizada	160
4.7.1.3	Gravedad específica para agregados gruesos	161
4.7.1.4	Gravedad específica para agregados finos	162
4.7.2	Asfalto AC-20	163
4.7.2.1	Ductilidad.....	163
4.7.2.2	Penetración	163
4.7.2.3	Punto de reblandecimiento	164
4.7.2.4	Índice de penetración	164
4.7.2.5	Punto de inflamación	165
4.7.2.6	Gravedad específica.....	165
4.7.3	Muestra Asfáltica de diseño	166
4.7.3.1	Elaboración de briquetas	167
4.7.3.2	Densidad bulk.....	167
4.7.3.3	Estabilidad y Flujo, Método Marshall	168

4.7.3.4	Gravedad específica máxima teórica.....	169
4.7.3.5	Análisis volumétrico de estabilidad.....	170
4.7.3.6	Tracción Indirecta “Modulo de elasticidad”	176
4.8	Sistema de adquisición de datos.....	177
CAPITULO V	.....	187
5 Conclusiones y recomendaciones	.....	187
5.1	Conclusiones.....	187
5.2	Recomendaciones.....	189
6 BIBLIOGRAFÍA	.....	192

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Granulometría de subbases</i>	26
Tabla 2	<i>Rodadura arena-asfalto y base y subbase granulares</i>	28
Tabla 3	<i>Especificaciones de las bases granulares</i>	29
Tabla 4	<i>Tamices de malla cuadrada para base clase I</i>	29
Tabla 5	<i>Tamices de malla cuadrada para base clase II</i>	30
Tabla 6	<i>Tamices de malla cuadrada para base clase III</i>	30
Tabla 7	<i>Tamices de malla cuadrada para base clase IV</i>	30
Tabla 8	<i>Índice de serviciabilidad</i>	35
Tabla 9	<i>Tabla nacional de pesos y dimensiones</i>	39
Tabla 10	<i>Clasificación funcional de las vías en función del TPDA</i>	40
Tabla 11	<i>Clasificación de pasante de agregados</i>	43
Tabla 12	<i>Clasificación de Trafico por IMPD</i>	44
Tabla 13	<i>Tratamiento y Cantidades de material por m² de emulsión asfáltica</i>	44
Tabla 14	<i>Coordenadas de ubicación ESPE</i>	63
Tabla 15	<i>Características ambientales</i>	64
Tabla 16	<i>Características de vuelo en zona de estudio</i>	65
Tabla 17	<i>Segundo vuelo en zonas de falla</i>	66
Tabla 18	<i>Coordenadas puntos de control</i>	67
Tabla 19	<i>Especificaciones de sensor</i>	70
Tabla 20	<i>Condiciones de vuelo para tomas térmicas</i>	71
Tabla 21	<i>Coefficientes a y b por Región del Ecuador</i>	74
Tabla 22	<i>Tráfico Diario Semana del 6 al 10 de noviembre</i>	75
Tabla 23	<i>Tráfico Diario Semana del 13 al 17 de noviembre</i>	76
Tabla 24	<i>Factor de equivalencia de carga</i>	78
Tabla 25	<i>Espesores mínimos sugeridos</i>	79
Tabla 26	<i>Clasificación de subrasantes</i>	84
Tabla 27	<i>Criterio de diseño Marshall</i>	88
Tabla 28	<i>Tipo de mezcla asfáltica</i>	88
Tabla 29	<i>Gradación de la muestra de ensayo a la resistencia de abrasión</i>	91
Tabla 30	<i>Número de esferas de acuerdo a su graduación</i>	91
Tabla 31	<i>Cantidad de muestra para ensayo granulométrico</i>	93
Tabla 32	<i>Cantidad de muestra por tamaño</i>	94
Tabla 33	<i>Grados de penetración</i>	103
Tabla 34	<i>Estilización granulométrica</i>	111
Tabla 35	<i>Irradiancia promedio diario</i>	137
Tabla 36	<i>Irradiancia promedio mes de noviembre</i>	139
Tabla 37	<i>HSP en días de estudio</i>	141
Tabla 38	<i>Energía Solar</i>	141
Tabla 39	<i>Radiación Solar Ho</i>	142

Tabla 40 <i>Radiación solar año 2016</i>	143
Tabla 41 <i>Radiación solar corregida</i>	143
Tabla 42 <i>Radiación solar en función de temperatura</i>	144
Tabla 43 <i>Conteo volumétrico de tráfico</i>	145
Tabla 44 <i>TPDA días de estudio</i>	146
Tabla 45 <i>Volúmenes de hora pico</i>	147
Tabla 46 <i>ESAL de diseño</i>	149
Tabla 47 <i>Áreas afectadas de carpeta de rodadura</i>	152
Tabla 48 <i>Coordenadas de calicata zona 3</i>	154
Tabla 49 <i>Espesores de estructura del pavimento</i>	155
Tabla 50 <i>Resultados de compactación</i>	157
Tabla 51 <i>Resultados CBR</i>	158
Tabla 52 <i>Resultados de abrasión de agregado grueso</i>	159
Tabla 53 <i>Estabilización granulométrica de diseño</i>	160
Tabla 54 <i>Resultados gravedad específica para agregado grueso</i>	161
Tabla 55 <i>Gravedad específica para agregado fino</i>	162
Tabla 56 <i>Resultados de penetración</i>	163
Tabla 57 <i>Punto de reblandecimiento</i>	164
Tabla 58 <i>Punto de inflamación</i>	165
Tabla 59 <i>Gravedad específica de Asfalto</i>	165
Tabla 60 <i>Caracterización de asfalto</i>	166
Tabla 61 <i>Densidad Bulk</i>	167
Tabla 62 <i>Estabilidad y flujo</i>	168
Tabla 63 <i>Ensayo RISE</i>	170
Tabla 64 <i>Resumen de Estabilización total</i>	171
Tabla 65 <i>Cumplimiento de análisis volumétrico</i>	172
Tabla 66 <i>Diseño de mezcla definitiva</i>	172
Tabla 67 <i>Comparación MTOP</i>	175
Tabla 68 <i>Diseño mezcla asfáltica</i>	176
Tabla 69 <i>Ensayo compresión diametral para material bituminoso</i>	176
Tabla 70 <i>Datos de temperatura</i>	178
Tabla 71 <i>Datos de humedad</i>	184

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructuración de Pavimento Flexible.....	7
Figura 2 Fisura longitudinal (izquierda), fisura transversal (derecha)	9
Figura 3 Fisura reflexión de junta en pavimento flexible	11
Figura 4 Fisura media luna	12
Figura 5 Fisura de borde.....	13
Figura 6 Fisura de bloque	14
Figura 7 Piel de cocodrilo	15
Figura 8 Deformación de abultamiento.....	17
Figura 9 Hundimiento	18
Figura 10 Ahuellamiento	19
Figura 11 Descascaramiento	20
Figura 12 Baches.....	21
Figura 13 Desgaste superficial	23
Figura 14 Afloraciones	24
Figura 15 Sección transversal de una vía Fuente: (AASHTO, 1993).....	25
Figura 16 Simbología de cartas de diseño	27
Figura 17 Deformaciones permanentes.....	34
Figura 18 TPDA Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE	38
Figura 19 Clasificación UAS/UAV	49
Figura 20 Aplicaciones de la tecnología UAV/UAS	50
Figura 21 Espectro de radiación solar	54
Figura 22 Piranómetro	56
Figura 23 Espectro electromagnético 1. Rayos X 2. UV 3. Visible 4. IR 5.	58
Figura 24 Cámara termográfica	58
Figura 25 Universidad de las fuerzas armadas ESPE	62
Figura 26 Esquema general de un sistema de reconocimiento de patrones	69
Figura 27 Variación climática en Sangolquí	71
Figura 28 “Weather Station WH Signature Serie 2”	72
Figura 29 Diagrama de Tráfico Diario Semana del 6 al 10 de Noviembre	75
Figura 30 Diagrama de Tráfico Diario Semana del 13 al 17 de Noviembre	76
Figura 31 Flujograma proceso de desarrollo de calicatas	80
Figura 32 Calicata en zona de estudio	81
Figura 33 Tamizado de material granular.....	83
Figura 34. Clasificación de Subrasantes	84
Figura 35 Moldes en piscina de sumersión.....	85
Figura 36 Rotura de molde CBR.....	86
Figura 37 Flujograma de mezcla asfáltica	87
Figura 38 Flujograma de agregados pétreos	89
Figura 39 Máquina de los ángeles.....	90

Figura 40	Gravedad específica de gruesos	95
Figura 41	Caracterización agregado fino	97
Figura 42	Muestra en bomba de vacío	98
Figura 43	Flujograma asfalto AC-20	99
Figura 44	Ensayo de ductilidad.....	101
Figura 45	Rotura de asfalto AC-20	102
Figura 46	Muestra para ensayo de penetración	102
Figura 47	Muestras en baño maría.....	104
Figura 48	Ajuste de aguja	104
Figura 49	Ensayo de penetración	105
Figura 50	Muestra de asfalto con inclusión de agua.....	106
Figura 51	Ensayo de inflamación.....	108
Figura 52	Ensayo de reblandecimiento	110
Figura 53	Agregados para la briqueta.....	112
Figura 54	Muestras para compactación.....	112
Figura 55	Mezcla de agregados y asfalto	113
Figura 56	Compactador	113
Figura 57	Muestras compactadas.....	114
Figura 58	Muestra en tanque de inmersión	115
Figura 59	Muestra extraída de tanque de inmersión	115
Figura 60	Probetas en baño maría	116
Figura 61	Ensayo Marshall	116
Figura 62	Material disgregado	117
Figura 63	Extracción de aire de muestra de asfalto.....	118
Figura 64	Estabilidad volumétrica Fuente: (Instituto Mexicano de Transporte, 2005)..	118
Figura 65	Probeta cilíndrica	119
Figura 66	Prensa Hidráulica	120
Figura 67	Ubicación de sensores de temperatura	122
Figura 68	Etapas requeridas para el SAD a implementar.....	123
Figura 69	Sensor de temperatura	125
Figura 70	Sensor de humedad	125
Figura 71	Hardware Configuration.....	127
Figura 72	Acondicionamiento de señal	128
Figura 73	Sistema de adquisición	129
Figura 74	Ortomosaico de zona de estudio	130
Figura 75	Ubicación de patologías en la vía	131
Figura 76	Puntos de control.....	132
Figura 77	Mapa de ubicación “zona 1”	132
Figura 78	Imagen termográfica patología “Bache”.....	133
Figura 79	Curva de masas 23 de noviembre del 2017	135
Figura 80	Curvas de masas 10 días de estudio.....	136

Figura 81 Irradiancia promedio	138
Figura 82 Horas de Sol Promedio.....	140
Figura 83 Zona 1 "Bache".....	150
Figura 84 Zona 2 "Falla longitudinal"	150
Figura 85 Zona 3 "Falla Transversal".....	151
Figura 86 Zona 4 "Falla en bloque"	151
Figura 87 Zona 5 "Hundimiento".....	151
Figura 88 Zona 6 "Piel de cocodrilo".....	151
Figura 89 Zona 7 "Descascaramiento"	151
Figura 90 Zona combinada de fallas "Mixta"	151
Figura 91 Perforación de zona de estudio	154
Figura 92 Identificación de subrasante	154
Figura 93 Medida de las capas granulares	154
Figura 94 Muestra para caracterización	154
Figura 95 Curva estabilizada	156
Figura 96 Curva de humedad optima	157
Figura 97 Curva de Diseño CBR	158
Figura 98 Curva granulométrica estabilizada.....	161
Figura 99 Ductilidad > 100cm	163
Figura 100 Briquetas realizadas	167
Figura 101 Tendencia de densidad bulk	168
Figura 102 Estabilidad de mezclas asfálticas	169
Figura 103 Flujo de mezclas asfálticas.....	169
Figura 104 RISE	170
Figura 105 Estabilidad para mezcla definitiva.....	173
Figura 106 Relación de vacíos vs porcentaje de asfalto.....	173
Figura 107 Flujo para mezcla definitiva	174
Figura 108 Volumen de agregado mineral	174
Figura 109 Relación filler/betun	175
Figura 110 Módulo de elasticidad	177
Figura 111 Ubicación de los sensores	178
Figura 112 Espectro de temperatura Sensor 1 y 3	182
Figura 113 Espectro de temperatura Sensor 2 y 4	182
Figura 114 Espectro de temperatura Sensor 1 y 2	183
Figura 115 Espectros de temperatura sensor 3 y 4	183
Figura 116 Espectro de humedad	186

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	35
Ecuación 2.....	36
Ecuación 3.....	41
Ecuación 4.....	41
Ecuación 5.....	41
Ecuación 6.....	41
Ecuación 7.....	73
Ecuación 8.....	77
Ecuación 9.....	77
Ecuación 10.....	92
Ecuación 11.....	92
Ecuación 12.....	96
Ecuación 13.....	96
Ecuación 14.....	96
Ecuación 15.....	96
Ecuación 16.....	98
Ecuación 17.....	98
Ecuación 18.....	98
Ecuación 19.....	98
Ecuación 20.....	106
Ecuación 21.....	121
Ecuación 22.....	148
Ecuación 23.....	164
Ecuación 24.....	164
Ecuación 25.....	170

RESUMEN

En esta investigación se ha llevado a cabo el estudio del pavimento flexible en todas sus capas, presente en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, mediante el uso de tecnología Termográfica y UAV (Vehículos no tripulados), el uso de estos sistemas se enfocó en llevar a cabo un levantamiento de la zona de estudio mediante fotografías ortodigitales y a su vez georreferenciar las diversas patologías existentes en todo su anillo vial, busca reducir el tiempo de trabajo en comparación al uso de una estación total, simultáneamente se aplica la tecnología termográfica mediante sensores de temperatura colocados en el pavimento a diferentes profundidades, mismos que receptaban las variaciones térmicas que sufre la carpeta de rodadura, inducidas por las condiciones climáticas propias de la zona. A estos resultados se los comparo con datos térmicos obtenidos del diseño de una nueva muestra asfáltica, valores que evidenciaron el mal estado del pavimento existe, esto debiéndose a que se ha perdido el ligante de la mezcla colocada, a su vez se demostró que el índice de serviciabilidad, el cual nos brinda un indicio claro de confort y seguridad vial, se encuentra en el valor de 1.1, demostrando que el pavimento existente en el anillo vial de la institución mencionada se encuentra en estado pobre. Es por tal motivo que mediante el estudio de tráfico realizado, se presenta el diseño de una nueva mezcla asfáltica, la cual relaciona los cambios climáticos, máxima radiación y como estos influencias directamente a la estructura vial existente en la zona.

- **TECNOLOGÍA**
- **UAV (VEHÍCULOS NO TRIPULADOS)**
- **PAVIMENTO FLEXIBLE**

ABSTRACT

In this investigation the study of the flexible pavement in all its layers, present in the University of the Armed Forces ESPE, has been carried out through the use of Thermographic technology and UAV (Unmanned Vehicles), the use of these systems focused on carry out an uprising of the study area by means of orthodigital photographs and at the same time georeferencing the diverse pathologies existing in all its road ring, it seeks to reduce the working time in comparison to the use of a total station, simultaneously the thermographic technology is applied by sensors of temperature placed on the pavement at different depths, which received the thermal variations suffered by the rolling folder, induced by the climatic conditions typical of the area. These results are compared with thermal data obtained from the design of a new asphalt sample, values that evidenced the bad condition of the pavement exists, this is due to the loss of the binder of the placed mixture, in turn it was shown that the index of serviceability, which gives us a clear indication of comfort and road safety, is at the value of 1.1, demonstrating that the existing pavement in the road ring of the aforementioned institution is in poor condition. It is for this reason that through the study of traffic performed, the design of a new asphalt mixture is presented, which relates climatic changes, maximum radiation and how these influences directly to the existing road structure in the area.

- **TECHNOLOGY**
- **UAV (UNMANNED VEHICLES)**
- **FLEXIBLE PAVEMENT**

CAPITULO I

1 Generalidades

1.1 Antecedentes

Jácome Mantilla, 2014 acota que la inversión de capital público de forma adecuada mediante un proceso oportuno de construcción y fiscalización genera una apropiada circulación vehicular con menor desgaste en el pavimento. López Castillo, 2014 afirma que el pavimento de una carretera está sujeto a la acción continua del tráfico y de la meteorología. Estos dos factores, junto con el envejecimiento natural de los materiales, hacen que el firme sufra un proceso de progresivo deterioro. Este envejecimiento y deterioro del firme conlleva una disminución paulatina en los niveles de seguridad y confort del tráfico, que al sobrepasar ciertos valores hacen necesaria una operación de conservación.

Se evidencia que no se ha tomado en cuenta un mantenimiento preventivo en este anillo de circulación, que refleje un estudio para prevenir el deterioro del pavimento, que minimice la necesidad de más trabajos de los necesarios como limpieza de alcantarillados, riesgos de taponamiento etc. Durante los procesos de mejoramiento, o reasfaltado del pavimento que se han realizado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Se observan varias intervenciones en el pavimento, con diferentes patologías de fallo las cuales se reflejan en la superficie de rodadura evidenciando un deterioro progresivo y permanente. El aumento permanente de la comunidad universitaria en los últimos años

ha provocado que los modos de falle sean agresivos, evidenciando el desgaste de los materiales. Las grietas y otros deterioros superficiales, que en su primera etapa no son notables, pueden ser la causa de serios defectos si no son reparados.

1.1 Identificación del problema

Macro

Para garantizar un mejor nivel de serviciabilidad de las vías del mundo, se han desarrollado diferentes tipos de investigaciones en diversos países, orientándose a la innovación de los materiales, de esta manera prolongando la durabilidad de los mismos y a su vez extender la vida útil del proyecto, sin embargo su enfoque ha priorizado infraestructuras viales nuevas, y en menor ímpetu a las existentes. Por lo tanto la implementación de estas tecnologías no abordado a los materiales de los corredores existentes, para mejor su nivel de servicio.

Meso

A nivel nacional se cuenta con aproximadamente 10000 km de red vial estatal en condiciones apropiadas (Ministerio de transporte y obras públicas, 2017), en su mayor parte están conformadas por hormigón asfáltico, el cual se ha visto afectado por diversos factores como la calidad del terreno donde se desarrolló el proyecto, las condiciones climáticas y sus cambios bruscos, presentes en las diferentes regiones del país, teniendo un gradiente térmico que oscila entre los 4°C y 23°C en un mismo día, el aumento del flujo vehicular presente en los últimos años acarreado que los pavimentos trabajen a una carga mayor a la diseñada. Todos estos aspectos han provocado modos de fallo en la

estructura del pavimento, generando patologías severas y estas a su vez incitando malestar, inseguridad y un alto grado de accidentalidad, por lo que se ve en la necesidad de realizar el mantenimiento correctivo y preventivo.

Micro

Por otra parte el Cantón Rumiñahui el cual posee un considerable porcentaje de vías de hormigón asfáltico, las cuales también se ha visto afectado por condiciones externas a las consideradas en el diseño. Como se puede observar en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en su anillo de circulación vial, misma que presenta signos de deformaciones permanentes y baches en la carpeta asfáltica, como causa del aumento progresivo de tráfico inducido por la comunidad universitaria en los últimos años, produciendo un mayor tiempo de circulación interna.

Además de las variaciones existen por un flujo de tráfico constante y de forma semejante a que su perímetro es utilizado como parqueadero lo cual provoca una sobrecarga de esfuerzos en uno de sus carriles. Estos factores tienden a deteriorar de manera progresiva las mezclas asfálticas, presentando una fatiga severa de los materiales, que se generan por procesos cíclicos de deformación, llegando de manera progresiva a afectar su cimentación; siendo estos aspectos los causantes de un mayor índice de insatisfacción, alto riesgo de accidentes, con mínimo confort en la vía. Por este motivo es indispensable plantear una alternativa de análisis y evaluación para solucionar los problemas de forma sencilla y con menores costos.

1.2 Justificación e importancia

El desarrollo en el área vial es de vital importancia para el crecimiento de un país, pero a su vez mantener las vías en óptimas condiciones y acondicionar las existentes tiene un costo muy elevado, debido a que el pavimento es diseñado para un periodo de vida útil, y para brindar un servicio determinado, viéndose este reducido en su capacidad por factores que lo deterioran con mayor rapidez.

Por tal motivo, al ser este anillo vial el principal distribuidor de tráfico vehicular interno, procedente de sus dos corredores aledaños como son la Av. General Enríquez y el Paseo Escénico, además de soportar la incidencia en el incremento vehicular de la comunidad universitaria para cada jornada laboral de trabajo, este refleja un aumento de tiempo de circulación produciendo un deterioro acelerado la capa de rodadura del pavimento.

En definitiva, es importante buscar metodologías de análisis para caracterizar de forma simple, rápida y más económica las fallas que pueden presentarse en el pavimento. Por esta razón el presente proyecto muestra una alternativa de análisis de las patologías existentes, que reflejan un índice de serviciabilidad, con estos resultados se puede implementar medidas correctivas y de mejoramiento en el pavimento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar superficialmente las condiciones del pavimento flexible mediante tecnología termográfica y procesamiento de imágenes UAV con el fin de obtener el índice de serviciabilidad del pavimento

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obtener condiciones idóneas y variaciones climáticas de la zona de estudio, para utilización de tecnología UAV.
- Caracterizar la carpeta de rodadura existente.
- Elaborar una mezcla asfáltica patrón en condiciones ideales (Establecido por la normativa MOP 001F) en función del TPDA de los vehículos que circulan en el anillo vial de la ESPE.
- Analizar el índice de serviciabilidad de la carpeta de rodadura existente mediante tecnología termográfica
- Determinar los espectros de variación térmica en la muestra asfáltica patrón y muestra asfáltica existente.

1.4 Metas

- Medición de la radiación solar mediante sensores esféricos y datos obtenidos de una estación meteorológica cercana.
- Evaluación de los materiales que constituyen la estructura del pavimento mediante extracción de núcleos y pruebas de laboratorio.
- Identificación de los parámetros mecánicos de estabilidad y flujo de la mezcla patrón mediante ensayos Marshall.
- Caracterización de los diversos tipos de fallas mediante imágenes termográficas.
- Instalación y monitoreo de la variación térmica mediante sensores y procesamiento de datos

CAPITULO II

2 Marco teórico

2.1 Pavimento

El pavimento es una estructura diseñada, y posteriormente construida por el ser humano con la finalidad de brindar un mejor estilo de vida a sus poblaciones, ofreciendo calidad de un terreno para la circulación vehicular, dotando al camino de confortabilidad, seguridad y a su vez permita una circulación con fluidez. Su estructura debe ser diseñada de tal manera que las cargas generadas por el tránsito no generen una deformación permanente excesiva. (UMSS, 2012)

2.1 Pavimento flexible

Son todos aquellos formados por una capa bituminosa afirmada sobre una o varias capas de material granular que transmiten los esfuerzos al terreno de soporte, mediante un mecanismo de disipación de tensiones. Estos pavimentos son aquellos que poseen un revestimiento asfáltico sobre una capa granular. La distribución de las cargas dinámicas producidas por los vehículos además de sus tensiones y deformaciones producidas en la estructura por las ruedas del tráfico, se presentan de tal forma que las capas de revestimiento y base absorben las cargas y tensiones verticales de compresión del suelo por medio de la absorción de las tensiones cizallantes. (UMSS, 2012).

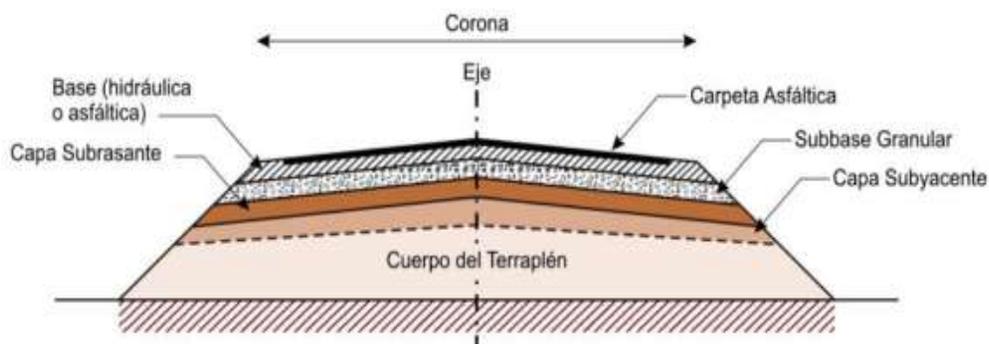


Figura 1 Estructuración de Pavimento Flexible

2.1.1 Definición de desempeño del pavimento

Se conoce como desempeño a la capacidad funcional y estructural, medible a lo largo de su periodo de diseño. Los usuarios beneficiarios de este servicio son aquellos que asignan un valor subjetivo de acuerdo a su calidad de circulación, aspecto, y seguridad.

La capacidad funcional comprende: (UMSS, 2012)

- Capacidad aceptada de rodadura
- Adecuada fricción superficial
- Geometría apropiada para la seguridad vial
- Apariencia (Estética).

La capacidad estructural del pavimento involucra soportar las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales. La funcionalidad y capacidad estructural están intrínsecamente relacionadas, esto corresponde a la manifestación de una disminución de su capacidad funcional, dando señales evidentes de un deterioro estructural en el pavimento, produciendo un incremento en rugosidad, ruido y un riesgo para los vehículos y ocupantes que lo transiten. (Cordo, 2006)

2.1.2 Indicadores de comportamiento:

Para poder indicar el comportamiento de un pavimento se tienen características medibles de forma cuantitativas y son correlacionarlas por medidas subjetivas de los usuarios. A las características se las considera como indicadores de comportamiento y son:

- Fallas visibles
- Capacidad Estructural
- Fricción Superficial
- Rugosidad/Serviciabilidad

2.2 Carpeta asfáltica características y patologías

Los pavimentos flexibles, son las estructuras viales con mayor presencia a nivel nacional, y hasta el momento son aquellas que tienen un mayor índice de construcción. De la misma forma este tipo de estructuras son más susceptibles a sufrir daños por diversos factores, siendo estos los que se detallan a continuación.

Clasificación de daños en pavimentos flexibles según el “Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles”

Los perjuicios en los pavimentos flexibles pueden ser clasificados en 4 categorías:

- Fisuras
- Deformaciones
- Perdidas de capas estructurales
- Daños superficiales

- Otros Daños

Entre cada una de las categorías mencionadas existen distintos deterioros que son originarios por diversos factores, varios de los cuales se han establecido mediante revisión bibliográfica, otros mediante evaluación de campo y ensayos de laboratorio. A continuación se detallaran cada uno de estos deterioros, su forma de medir, el daño y las unidades de medida, sus posibles causas y la evolución probable. (Cordo, 2006)

2.2.1 Fisuras

2.2.1.1 Fisuras longitudinales y transversales (FL, FT)

Estos daños corresponden a discontinuidades en la carpeta asfáltica, en la misma dirección del tránsito o transversal a él. Dichas fallas se presentan debido a la presencia de esfuerzos de tensión en alguna de las capas de la estructura, las cuales han superado la resistencia del material afectado. La localización de fisuras en el carril es un buen indicativo de las causas que los genero, ya que muchas de las que se encuentran en zonas sujetas a cargas pueden relacionarse con problema de fatiga en toda la estructura o en alguna sección de esta. Como se observa en la figura 2. (INVIAS, 2006)



Figura 2 Fisura longitudinal (izquierda), fisura transversal (derecha)

Este tipo de falla en los pavimentos se presentan con mayor regularidad en los caminos, y su unidad de medida es en metros lineales (m). Es posible determinar el área de afectación por deterioro en metros cuadrados (m²), multiplicando la longitud de la fisura por un ancho referencial establecido de 0.6m. Cuando existan varias fisuras muy cercanas se reportara el área total de la zona de afectación en (m²), de ser posible por la severidad del caso, de lo contrario se asignara toda el área de mayor severidad encontrada. (INVIAS, 2006)

Causas:

- Rigidización de la mezcla asfáltica por pérdida de flexibilidad debido a un exceso de filler (material de origen mineral, no arcilloso, que pasa el tamiz No 200), o al envejecimiento del asfalto, ocurre ante bajas temperaturas o gradientes térmicos altos (generalmente mayores a 30°C). (UMSS, 2012)

Otras causas para producir las fisuras transversales son:

- Corresponder a zonas de contacto entre corte y terraplén por la diferencia de rigidez de los materiales de la subrasante
- Espesor insuficiente de la capa de rodadura

Probable evolución:

Piel de cocodrilo, desintegración, descaramiento, asentamientos longitudinales trasversales (por ingreso de agua), fisuras de bloque.

2.2.1.2 Fisuras por reflexión de juntas o grietas en placas de concreto (FJL o FJT)

Las fisuras de este tipo son producidas cuando existe una capa de concreto asfáltico sobre placas de concreto rígido dichas fisuras se exteriorizan por la proyección en superficies de las juntas de dichas placas. Figura 3

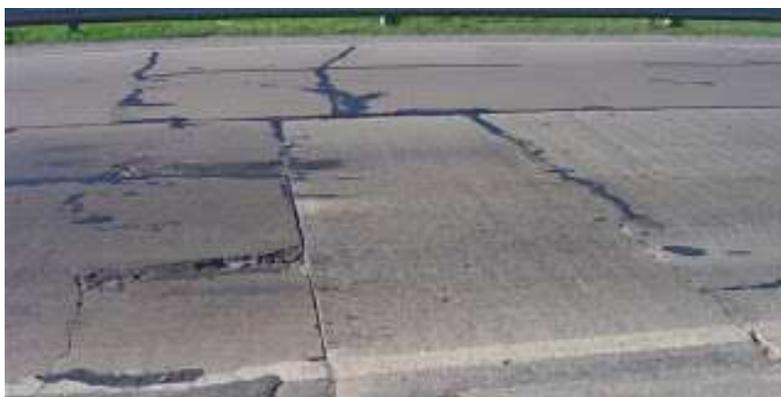


Figura 3 Fisura reflexión de junta en pavimento flexible

Causas:

Son generadas por los movimientos de las juntas entre las placas de concreto rígido o de los bloques desarrollados por las grietas existentes de este, debido a los cambios de temperatura y humedad. (UMSS, 2012)

Unidad de medida:

Determinar el área de afectación por deterioro en metros cuadrados (m²)

Probable evolución:

Fisuras en bloque, descascaramiento, baches.

2.2.1.3 Fisuras en media luna (FML)

Denomina de esta manera por tomar una forma parabólica asociada al movimiento de la banca por lo que usualmente se presenta acompañada de hundimientos. Figura 4



Figura 4 Fisura media luna

Causas:

- Falla lateral del talud en zonas de terraplén
- Falla de talud en zonas de corte a media ladera
- Ausencia o falla de obra de contención de la banca
- Consolidación de los rellenos que acompañan las obras de contención

Unidad de medición:

Para obtener la medida real de la falla se debe registrar el área que abarca la sección completa de la medialuna en metros cuadrados (m²), correspondiente a la longitud de vía afectada multiplicanda por el ancho de afectación de la fisura, estableciendo el grado de severidad correspondiente.

Probable evolución:

Crecimiento del proceso (aumento del área afectada), ampliación del hundimiento, pérdida de la banca.

2.2.1.4 Fisura de borde (FB)

Estas corresponden a fisuras con propensión longitudinal a semicircular localizadas cerca del borde la calzada, presentándose principalmente por ausencia de bermas o diferencias de nivel entre berma y calzada. Comúnmente se desarrollan dentro de una franja paralela al borde, con un ancho verificable de hasta 0.6 m². (Ver Figura 5)



Figura 5 Fisura de borde

Causas:

La más relevante para este tipo de daño es la falta de confinamiento lateral de la estructura por ausencia de bordillos, anchos de berma insuficientes o sobre carpetas que llegan hasta el borde del carril y quedan en desnivel con la berma. (UMSS, 2012)

Unidad de medición:

Determinar el área de afectación por deterioro en metros cuadrados (m²)

Probable evolución:

Desprendimiento del borde o descascaramiento.

2.2.1.5 Fisura de bloque (FBL)

Para considerar de manera más exacta este tipo de fisura, a este se lo debe dividir en bloques de forma aproximadamente rectangular. Los bloques deben tener lado promedio de 0.30 m. Estas fisuras son presentes con recurrencia en zonas o áreas no cargadas.

Figura 6



Figura 6 Fisura de bloque

Causas:

- Este tipo de fisuración se debe principalmente por la contracción del hormigón asfáltico debido a la variación de temperatura durante el día, lo cual se traduce en ciclos de cambio de esfuerzos de deformación sobre la mezcla. La presencia de este tipo de falla estructural indica que el asfalto se ha endurecido significativamente, lo cual ocurre debido al envejecimiento de la mezcla o al uso incorrecto de algún tipo de asfalto para las condiciones climáticas de la zona.
- Combinación del cambio volumétrico del agregado fino de la mezcla asfáltica con el uso de un asfalto de baja penetración.

Unidad de medición:

Para realizar su cálculo se procede a tomar el área de superficie de pavimento afectada en metros cuadrados (m²). Se pueden presentar varias severidades en un misma área, en el caso de ser así se registrarán las áreas correspondientes a cada una de ellas, o de lo contrario se registra toda el área afectada y se asignará el mayor grado de severidad o daño existente.

Probable evolución:

Descaramiento, Piel de cocodrilo.

2.2.1.6 Piel de cocodrilo (PC)

Esta corresponde a una serie de fisuras interconectadas con patrones irregulares, generalmente localizadas en zonas sujetas a repeticiones de carga. Su mayor característica es la fisuración del pavimento iniciando por el fondo de las capas asfálticas, donde los esfuerzos de tracción son mayores bajo la acción de las cargas. Figura 7 (UMSS, 2012)



Figura 7 Piel de cocodrilo

Las fisuras se propagan a la superficie inicialmente como una o más fisuras longitudinales paralelas. Debido a la repetición de las cargas dinámicas producidas por el tránsito, las fisuras se propagan formando piezas angulares con un modelo parecido a la piel del cocodrilo, teniendo estas un diámetro promedio de 30 cm. (INVIAS, 2006)

Causas:

- La causa más frecuente de esta es por fatiga de la estructura o de la carpeta asfáltica
- Espesor de estructura insuficiente
- Falta de compactación de las capas, reparaciones mal ejecutadas
- Subrasantes expansivas
- Problemas de drenaje que afectan los materiales granulares
- Rigidización de la mezcla asfáltica en zonas de carga (por oxidación del asfalto o envejecimiento).

Unidad de medición:

Se reporta el área afectada en metros cuadrados (m²). Cuando en un área se pueden evidenciar diferentes tipos se reporta el área completa asignándole la mayor severidad presente.

Probable evolución:

Deformaciones, descascaramiento, baches.

2.2.2 Deformaciones

2.2.2.1 Abultamiento (AB)

Se asigna a los “abombamientos” o prominencias que se presentan en la superficie de los pavimentos. Se pueden presentar violentamente invadiendo áreas pequeñas o gradualmente grandes, y en algunos casos acompañados de fisuras. Figura 8



Figura 8 Deformación de abultamiento

Causas:

Su generación se debe principalmente por la expansión de la subrasante o en capas de concreto asfáltico sobre placas de concreto rígido, el cual se deforma al existir presiones bajo la capa asfáltica.

Unidad de medición:

Se lo realiza por metros cuadrados (m²) de área de afectación.

Probable evolución:

Fisuración, desprendimiento, exudación, ahuellamiento.

2.2.2.2 Hundimiento (HUN)

Este tipo de deformación corresponde a depresiones localizadas en el pavimento con respecto al nivel de la rasante. Al producirse desnivel en la calzada este tipo de daño, puede generar un mayor índice de inseguridad para los vehículos, llegando a situaciones de mayor consideración cuando estos contienen agua, ocasionando hidroplaneo. Los hundimientos ocasionalmente pueden estar orientados de forma longitudinal o transversal al eje de la vía, o también pueden tomar forma de medialuna. Figura 9 (INVIAS, 2006)



Figura 9 Hundimiento

Causas:

- Asentamientos en la subrasante
- Deficiencia de compactación de las capas inferiores del pavimento, del terraplén o en las zonas de acceso a obras de arte o puentes.
- Diferencia de rigidez en los materiales de la subrasante en los sectores de transición entre corte y terraplén.
- Deficiencia de compactación de rellenos en zanjas que atraviesan la calzada

Unidad de medición:

Se cuantifica el área afectada en metros cuadrados (m²).

Probable evolución:

Fisuración, desprendimiento, movimientos en masa

2.2.2.3 Ahuellamiento (AHU)

Este tipo de deformación se desarrolla por una depresión de zona localizada sobre la trayectoria de las llantas de los vehículos. Se caracteriza por encontrarse acompañado de una elevación de las áreas adyacentes de la zona deprimida. Figura 10



Figura 10 Ahuellamiento

Causas:

- Esta falla ocurre principalmente por deformaciones permanentes de alguna de las capas del pavimento o de la subrasante, generada por deformaciones plásticas del concreto.
- Por deformaciones de la subrasante debido a la fatiga de la estructura ante la repetición de cargas.

- Conjuntamente la estructura del pavimento puede padecer este tipo de falla por deficiencia en el diseño, manifestándose cuando la vía es sometida a cargas de tránsito muy elevadas.

Unidad de medición:

Se cuantifica el área afectada en metros cuadrados (m²), asignando la severidad de acuerdo con la zona de mayor profundidad.

Probable evolución:

Piel de cocodrilo, desprendimiento

2.2.3 Pérdidas de las capas de la estructura**2.2.3.1 Descascaramiento (DC)**

Esta situación concierne al desprendimiento de parte de la capa asfáltica superficial, sin llegar a afectar las demás capas asfálticas inferiores. Figura 11



Figura 11 Descascaramiento

Causas:

- Limpieza insuficiente previa a tratamiento superficial
- Espesor insuficiente de la capa de rodadura asfáltica
- Riego de liga deficiente
- Mezcla asfáltica muy permeable

Unidad de medición:

Se cuantifica el área afectada por cada severidad en metros cuadrados

Probable evolución:

Piel de cocodrilo, baches.

2.2.3.2 Baches (BCH)

Considerada una de las fallas más representativas presente en el pavimento, debiéndose al desprendimiento total de la carpeta asfáltica que deja expuestos los demás materiales granulares lo que conlleva a la ampliación del área afectada y al aumento de la profundidad debido a la acción del paso vehicular. Figura 12



Figura 12 Baches

Causas:

La causa principal de que exista este deterioro es por la presencia de agua en zonas fisuradas, que ante la acción del tránsito produce una reducción de los esfuerzos efectivos generando deformaciones y la falla del pavimento. Otra de las consecuencias se debe por defectos constructivos (carencia de penetración de la imprimación en bases granulares) o una deficiencia de espesores de capas estructurales.

Unidad de medición:

Se cuantifica el área afectada en metros cuadrados, registrando la mayor severidad existente.

Probable evolución:

Destrucción de la estructura.

2.2.4 Daños Superficiales**2.2.4.1 Desgaste superficial (DSU)**

Daño ocasionado principalmente por el deterioro del pavimento provocado por la acción del tránsito, además de agentes abrasivos o erosivos. Se presentan mayormente en la zona de circulación de los vehículos, siendo este daño un acelerador del deterioro del pavimento por acción del medio ambiente. Figura 13 (INVIAS, 2006)



Figura 13 Desgaste superficial

Causas:

Este tipo de falla se debe generalmente al deterioro natural del pavimento, aunque si se exterioriza con severidad a edades tempranas se puede asociar a un endurecimiento significativo del asfalto. Se puede presentar este tipo de problemas por otros como:

- Falta de adherencia del asfalto con los agregados
- Deficiente dosificación de asfalto en la mezcla.

Unidad de medición:

Se cuantifica el área afectada en metros cuadrados (m²).

Probable evolución:

Perdida de agregado.

2.2.5 Pérdidas de las capas de la estructura

Separado de los problemas anteriormente mencionados se pueden definir otros que pueden aparecer como consecuencia de los primeros, (INVIAS, 2006)

2.2.5.1 Afloraciones de agua (AFA)

Reconocida principalmente por la presencia de líquido en la superficie del pavimento en instantes en los cuales no existe presencia de lluvia. Figura 14



Figura 14 Afloraciones

Causas:

Ausencia o inadecuado sistema de subdrenaje, filtración de agua

Unidad de medición:

Se cuantifica por metro (m) cuando no tiene otro daño asociado sin embargo, cuando el afloramiento se presenta donde existe un daño se debe reportar el daño. (INVIAS, 2006)

Probable evolución:

Piel de cocodrilo, descascaramiento, baches.

2.3 Evaluación estructural de pavimento flexible en zona de estudio

Un pavimento comprende un conjunto de capas superpuestas relativamente horizontales que se diseñan y construyen directamente con materiales apropiados y debidamente compactados. Esta estructura estratificada se asienta sobre la subrasante

(terreno natural o mejorado), mismo que ha de resistir los esfuerzos dinámicos de los vehículos que transiten durante el periodo para el cual fue diseñada. La figura 15 representa una sección transversal de una vía en donde se aprecia la estructura del pavimento flexible. (Espinoza, 2018)

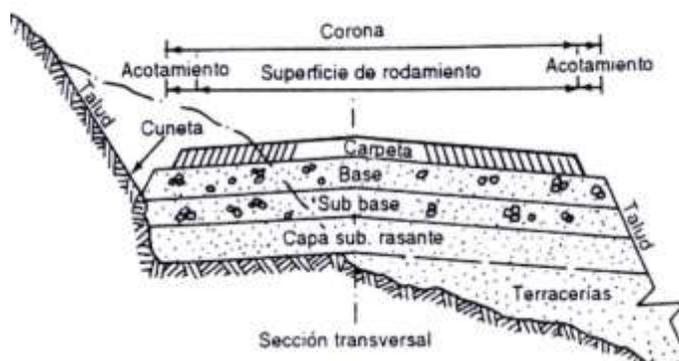


Figura 15 Sección transversal de una vía

Fuente: (AASHTO, 1993)

2.3.1 Subrasante

La capa de subrasante (terreno natural) puede ser modificada o estabilizada de ser necesaria. Las alternativas a seguir serán determinadas de acuerdo a un análisis técnico. Se recomienda este procedimiento cuando se presenten subrasantes clasificadas como pobres ($CBR < 6\%$), se procede a eliminar el material inadecuado y colocar un material de reemplazo ($CBR > 10\%$). (Espinoza, 2018)

2.3.2 Subbase granular

La subbase se colocará sobre la subrasante anteriormente preparada y aprobada, de conformidad con las alineaciones, y sección transversal señaladas en el diseño. Las subbases de clase 1, 2 y 3 deberán cumplir con un valor de CBR no menor de 30% y la

porción que pase el tamiz N° 40 deberá tener un índice de plasticidad menor que 6 y un límite líquido máximo de 25. Los agregados empleados deberán tener un coeficiente de desgaste de 50%, de acuerdo con el ensayo de abrasión. (MTOP F001, 2002)

Además de las consideraciones mencionadas anteriormente, estas deberán cumplir con la granulometría presentada a continuación en la tabla 1

Tabla 1
Granulometría de subbases

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada		
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3
3" (76.2 mm.)	--	--	100
2" (50.4 mm.)	--	100	--
1 1/2 (38,1 mm.)	100	70 - 100	--
N° 4 (4,75 mm.)	30 - 70	30 - 70	30 - 70
N° 40 (0.425 mm.)	10 - 35	15 - 40	--
N° 200 (0.075 mm.)	0 - 15	0 - 20	0 - 20

Fuente: (MOP F-001, 2002)

La función más importante es impedir la acción del bombeo en las juntas, grietas y extremos del pavimento. Se entiende como bombeo a la fluencia de material fino con agua fuera de la estructura del pavimento, debido a la infiltración de agua por las juntas de las losas. El agua que penetra a través de las juntas licua el suelo fino de la subrasante facilitando así su evacuación a la superficie bajo la presión ejercida por las cargas circulantes. (Fonseca, 2010)

A su vez La normativa INVIAS del año 1997, presenta espesores estandarizados para bases y subbases utilizando cartas de diseño mismas que brindan diferentes alternativas

estructurales de diseño, estas se presentan a continuación en la tabla 2, utilizando la simbología presentada en la figura 16:

T.S.D.	Tratamiento superficial doble
	Base granular
	Sub base granular
	Subrasante mejorada
	Base estabilizada con cemento
	Sub base estabilizada con cal
	Base estabilizada con emulsión asfáltica
A.A.	Capa de rodadura de arena-asfalto
A.A.	Lechada asfáltica
F.A.M.	Mezcla abierta en frío

Figura 16 Simbología de cartas de diseño

Fuente: (INVIAS, 1997)

La carta presentada a continuación cumple las especificaciones para vías con tráfico ligero y diseñada con materiales granulares.

Tabla 2
Rodadura arena-asfalto y base y subbase granulares

	T1	T2	T3
S1			
S2			
S3			
S4			
S5			

Fuente: (INVIAS, 1997)

2.3.3 Base granular

Esta parte de la estructura está conformada por la construcción de capas de agregado triturado total o parcialmente estabilizada con agregado fino proveniente de la trituración o suelos finos seleccionados o ambos. (MTOF F001, 2002)

Para el diseño de una base granular se deben considerar los cuatro tipos de estas que existen, mismas que deben cumplir con un CBR mayor o igual a 80%. A continuación en la Tabla 3 se presentan recomendaciones para el uso de los diferentes tipos de bases.

Tabla 3
Especificaciones de las bases granulares

Tipo de Base	Tipo de Carretera	Número de Carriles	TPDA
Base Clase I	Para uso principalmente en aeropuertos y carreteras con intenso trafico	8 a 12	> 50000
Base Clase II	Carreteras de 2 hasta 6 carriles, con un ancho mínimo de 3.65 m incluye franja central de 2 a 4 m	2 a 6	8000 – 50000
Base clase III	Vías internas de urbanización con bajo nivel de trafico	2 a 4	1000 – 8000
Base clase IV	Caminos vecinales	2	< 1000

Fuente: (MTOF F001, 2002)

De forma similar se presenta a continuación las tablas de la 4 hasta la 7 con los tamices de malla cuadrada para determinar la granulometría de cada una de las diferentes bases planteadas anteriormente.

Tabla 4
Tamices de malla cuadrada para base clase I

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada	
	Tipo A	Tipo B
2" (50.8 mm.)	100	--
1 1/2" (38,1mm.)	70 - 100	100
1" (25.4 mm.)	55 - 85	70 - 100
3/4"(19.0 mm.)	50 - 80	60 - 90
3/8"(9.5 mm.)	35 - 60	45 - 75
Nº 4 (4.76 mm.)	25 - 50	30 - 60
Nº 10 (2.00 mm.)	20 - 40	20 - 50
Nº 40 (0.425 mm.)	10 - 25	10 - 25
Nº 200 (0.075 mm.)	2 - 12	2 - 12

Fuente: (MTOF F001, 2002)

Tabla 5
Tamices de malla cuadrada para base clase II

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
1" (25.4 mm.)	100
3/4"(19.0 mm.)	70 - 100
3/8"(9.5 mm.)	50 - 80
Nº 4 (4.76 mm.)	35 - 65
Nº 10 (2.00 mm.)	25 - 50
Nº 40 (0.425 mm.)	15 - 30
Nº 200 (0.075 mm.)	3 - 15

Fuente: (MTOP F001, 2002)

Tabla 6
Tamices de malla cuadrada para base clase III

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
3/4"(19.0 mm.)	100
Nº 4 (4.76 mm.)	45 - 80
Nº 10 (2.00 mm.)	30 - 60
Nº 40 (0.425 mm.)	20 - 35
Nº 200 (0.075 mm.)	3 - 15

Fuente: (MTOP F001, 2002)

Tabla 7
Tamices de malla cuadrada para base clase IV

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada
2" (50.8 mm.)	100
1" (25.4 mm.)	60 - 90
Nº 4 (4.76 mm.)	20 - 50
Nº 200 (0.075 mm.)	0 - 15

Fuente: (MTOP F001, 2002)

2.3.4 Carpeta de rodadura

Es una capa aglomerada de agregados pétreos y asfalto, generalmente semi cerrada o cerrada diseñada para resistir la abrasión y desintegración por efectos ambientales. Es una capa de espesor variable utilizada para eliminar irregularidades de la superficie existente antes de cubrirla con un tratamiento nuevo o con una carpeta de recubrimiento.

Como ya se mencionó anteriormente, los pavimentos flexibles son aquellos que tienen superficies compuestas por materiales bituminosos, los cuales proporcionan características mecánicas de comportamiento y distribución de los esfuerzos en forma de flexión ante las cargas impuestas a estos.

2.4 Evaluación funcional de pavimento flexible en zona de estudio

Al enfocarnos en el análisis funcional de una estructura vial, haremos referencia a su carpeta de rodadura y como esta se ve afectada en la zona de implantación de la infraestructura y como los medios ambientales, le afectan.

2.4.1 Reología de pavimentos

Los principales problemas que se presentan en los pavimentos asfálticos en servicio son la resistencia a la fatiga y la deformación permanente, como consecuencia de una inadecuada dosificación ligante-agregado, sus interacciones, el método y la temperatura de colocación, mezclado y compactación de la mezcla asfáltica. Las propiedades deseables en las mezclas asfálticas son: resistentes al desplazamiento, a la fatiga, al deslizamiento, a la deformación plástica, impermeables, durables, grado adecuado de flexibilidad. (Cardenas & Fonseca, 2009)

El desempeño, durabilidad y resistencia de la mezcla asfáltica depende directamente de las propiedades del ligante y el agregado, su interrelación, y de los procesos de elaboración, colocación y compactación (Cardenas & Fonseca, 2009)

El asfalto se clasifica como material visco elástico porque exhibe características viscosas y elásticas simultáneamente, es decir que es un material de comportamiento intermedio entre el sólido de Hooke (elástico) y el líquido de Newton (viscoso). A temperaturas elevadas ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$), el cemento asfáltico se comporta como un fluido viscoso (muestra la consistencia de un lubricante utilizado como aceite para motores), mientras que a bajas temperaturas ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) se comporta casi como un sólido elástico (como una banda de goma). Cuando se aplica una carga, el ligante se estira o comprime adoptando diferentes formas. (Cardenas & Fonseca, 2009)

Para el caso de los pavimentos flexibles, es importante analizar el comportamiento reológico ya que sus capas asfálticas son termoplásticas y visco elásticas. El conocimiento de este comportamiento es muy complejo por la fuerte incidencia del clima (variaciones de temperatura) que hacen oscilar su estabilidad en el corto y largo plazo, afectando con ello a la totalidad del sistema multicapa. (Bergel, 1990)

2.4.2 Patologías en condiciones de variación climática

Diversos factores afectan el desempeño de un pavimento entre estos la temperatura, la tensión de cargas, el envejecimiento y la humedad. Actualmente los pavimentos son sometidos a mayores volúmenes de tránsito, mayores cargas y condiciones climáticas extremas. El diseño, caracterización y evaluación de los pavimentos en los laboratorios se realizan estudiando su comportamiento teniendo en cuenta sus diferentes modos de

falla. Las fallas que se presentan en un pavimento pueden dividirse en fisuraciones (térmicas o por fatiga) y deformaciones permanentes.

2.4.2.1 Fisuraciones en condiciones de temperatura variable

La fisuración es un fenómeno complejo que puede ser causado por varios factores, se le asocia con tensiones inducidas en el pavimento producto de las cargas de tránsito, por condiciones climáticas o una combinación de las dos. Una mezcla asfáltica al contener un ligante, tiene un comportamiento visco elástico. Si sometemos una mezcla asfáltica a deformaciones que se mantengan constantes en el tiempo una tensión se induce en la misma. Dependiendo de la temperatura esa tensión se disparará más o menos rápido. A esto se lo conoce como relajación, es decir a altas temperaturas la relajación se produce en pocos minutos, a diferencia de encontrarse a bajas temperaturas donde esta puede llevar horas o incluso días. (Morea, 2011)

La fisuración es producida cuando la tensión es inducida por variaciones térmicas que exceden la resistencia a tracción de la mezcla, este estado es alcanzado al haberse suscitado diversos estados de carga y descarga que van consumiendo la capacidad de la mezcla de resistir las tensiones inducidas. En donde la fisuración por fatiga se asocia a temperaturas medias del pavimento entre 10 a 30 °C y es producto de la acción sucesiva de las cargas o ciclos térmicos. Por otra parte la fisuración térmica se produce solo en ciclos de enfriamiento. La mezcla se enfría y al impedir las capas inferiores la libre contracción, se genera tensiones que de superar la resistencia a tracción provocara la fisuración; este tipo de fisuración se da a temperaturas por debajo de los 0 °C. (Morea, 2011)

2.4.2.2 Deformaciones permanentes a temperatura variable

Conocidas como ahuellamiento y se caracterizan por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. Esta representa la acumulación de pequeñas formaciones producidas con cada aplicación de carga que son irreversibles, como se observa en la figura 17.



Figura 17 Deformaciones permanentes

Este proceso se ve favorecido por la acción combinada de altos niveles de tránsito pesado y/o lento y elevadas temperaturas. Los pavimentos ahuellados tienen una seguridad deficiente porque los surcos que se forman retienen suficiente agua que produce hidroplaneo o acumulación de hielo. (Morea, 2011)

2.4.3 Índice de Serviciabilidad

La Guía AASHTO establece que “La serviciabilidad es la habilidad específica de una sección de pavimento para servir al tráfico”. (Cordo, 2006) Se deben distinguir, la serviciabilidad inicial y final. La inicial es función del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción, y la final está relacionada a la falla funcional del pavimento.

Si tomamos como relevantes que las fallas, la fricción superficial, y la condición estructural son indicadores trascendentales en términos ingenieriles de las condiciones

de un pavimento, los beneficiarios califican el estado de un pavimento en términos de calidad y seguridad para circular sobre ellos. Es decir la serviciabilidad se define como la capacidad del pavimento para brindar un uso confortable y seguro a los usuarios. La tabla 8 detalla la serviciabilidad en términos de Clasificación de Serviciabilidad Presente (PSR=Present Serviceability Rating).

Tabla 8
Índice de serviciabilidad

PSR	Condición
0-1	Muy Pobre
1-2	Pobre
2-3	Regular
3-4	Buena
4-5	Muy Buena

Fuente: (INVIAS, 1997)

En el Road Test de la AASHTO se calificó cada pavimento con PSR y este valor se correlaciono con condiciones medibles del pavimento: fisuras, ahuellamiento (únicamente en pavimentos flexibles), varianza de perfil (rugosidad) y parches. Para calcular lo anteriormente mencionado se dedujo la siguiente ecuación el cual determina el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI=Present Serviceability Index) el cual es una estimación del PSR basada en fallas y rugosidad. (Cordo, 2006)

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + SV) - 1.38(RD^2) - 0.01(C + P)^{0.5}$$

Ecuación 1

Donde:

Sv: varianza del perfil sobre la sección en estudio, medida con el perfilómetro CHLOE, x 10 (pul/pie)².

RD: profundidad de ahuellamiento medio, pul.

C: piel de cocodrilo, clase 2 y clase 3 (pies²/1000pies²). Clase 2 significa que todas las fisuras se han unido para formar la piel de cocodrilo, Clase 3 se indica cuando algunos trozos del cuarteado resultante han desaparecido.

P: parches (pies²/1000pies²).

El índice de servicio inicial P_o depende del diseño y de la calidad de la construcción. En los pavimentos flexibles estudiados por la institución de asfaltos AASHTO, el pavimento nuevo alcanzó un valor medio de $P_o = 4,2$. El índice de servicio final P_t constituye al índice más bajo capaz de ser soportado por el pavimento, antes de que sea indispensable su rehabilitación mediante un refuerzo o una reconstrucción. El valor asumido depende de la importancia de la carretera y del criterio del proyectista, se sugiere para carreteras de mayor tránsito un valor de $P_t \geq 2,5$ y para carreteras de menor tránsito $P_t = 2,0$. (Cossi, 2012)

2.4.3.1 Pérdida o disminución del índice de serviciabilidad

Los valores anteriormente descritos nos permiten determinar la disminución del índice deservicio, que representa una pérdida gradual de la calidad de servicio de la carretera, originada por el deterioro del pavimento. (Cossi, 2012)

$$PSI = P_o - P_t$$

Ecuación 2

Donde:

PSI: Índice de Servicio Presente

Δ PSI: Diferencia entre los índices de servicio inicial y el final deseado

Po: Índice de servicio inicial

Pt: Índice de servicio final

Por tal motivo se deben tomar en cuenta los siguientes 5 aspectos fundamentales al referirnos del índice de serviciabilidad:

- a) Las carreteras están hechas para el confort y conveniencia del público usuario.
- b) El confort, o calidad de la transitabilidad, es materia de una respuesta subjetiva de la opinión del usuario.
- c) La serviciabilidad puede ser expresada por medio de la calificación hecha por los usuarios de la carretera y se denomina la calificación de la serviciabilidad.
- d) Existen características físicas de un pavimento que pueden ser medidas objetivamente y que pueden relacionarse a las evaluaciones subjetivas. Este procedimiento produce un índice de serviciabilidad objetivo.
- e) El comportamiento puede representarse por la historia de la serviciabilidad del pavimento.

2.5 Estudio de tráfico

Para diseñar una mezcla asfáltica, se debe tomar en cuenta el tráfico promedio diario anual, que circulan por la vía, de esta manera se estimara la faja de diseño establecida por la normativa MTOP F001.

2.5.1 Tráfico promedio diario anual (TPDA)

El TPDA es aquel que toma en cuenta la cantidad de vehículos que circulan por una vía, para obtener este valor se debe realizar un conteo en tiempo real para realizar una estimación seria para el diseño vial. Como se observa en la figura 18



Figura 18 TPDA Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

2.5.1.1 Disposición y tipo de tráfico

A la hora de realizar el diseño de la estructura de un pavimento, se debe tomar en cuenta el tipo de vehículo que circulara por la infraestructura y como este transmitirá los esfuerzos dinámicos al terreno. Para caracterizar de manera adecuada el tráfico se tomara en cuenta el número de ejes y las cargas que estos producen. La tabla 9 se detalla los tipos, las cargas que transmiten y el número de ejes de cada tipo de vehículo.

Tabla 9
Tabla nacional de pesos y dimensiones

TIPO	DISTRIBUCIÓN MÁXIMA DE CARGA POR EJE	DESCRIPCIÓN	PESO MÁXIMO PERMITIDO (Ton.)	LONGITUDES MÁXIMAS PERMITIDAS (metros)		
				largo	Ancho	Alto
2 D			7	5,00	2,60	3,00
2DA			10	7,50	2,60	3,30
2DB			18	12,20	2,60	4,10
3-A			27	12,20	2,60	4,10
4-C			31	12,20	2,60	4,10
4-0			32	12,20	2,60	4,10
V2DB			18	12,20	2,60	4,10
V3A			27	12,20	2,60	4,10
VZ5			27	12,20	2,60	4,10
T2			18	8,50	2,60	4,10
T3			27	8,50	2,60	4,10
S3			24	13,00	2,60	4,10
S2			20	13,00	2,60	4,10
S1			11	13,00	2,60	4,10
R2			22	10,00	2,60	4,10
R3			31	10,00	2,60	4,10
B1			11	10,00	2,60	4,10
B2			20	10,00	2,60	4,10
B3			24	10,00	2,60	4,10

Fuente: (Ministerio de Obras Publicas y Transporte, 2006)

2.5.2 Clasificación de las vías según TPDA

Para realizar una estimación del tipo de vía nos referiremos a la Normativa de Movilidad Transporte y Obras Públicas. La tabla 10 detalla los límites y descripción de los diferentes tipos de vías.

Tabla 10

Clasificación funcional de las vías en función del TPDA

Clasificación Funcional de las Vías en base al TPDA			
Descripción	Clasificación Funcional	Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) al año de horizonte	
		Límite Inferior	Límite Superior
Autopista	AP2	80000	120000
	AP1	50000	80000
Autovía o Carretera Multicarril	AV2	26000	50000
	AV1	8000	26000
Carreteras de 2 carriles	C1	1000	8000
	C2	500	1000
	C3	0	500

Fuente: (MTO, NEVI-12 Volumen 2A, 2012)

Donde:

C1: Equivale a carreteras de mediana capacidad

C2: Equivalente a carretera convencional básica y camino básico

C3: Camino agrícola/forestal

2.5.2.1 Cálculo y estimación de Tráfico Promedio Diario Anual “TPDA”

Para el desarrollo del presente cálculo se realizara un conteo diario en tiempo real, empezando desde el día lunes hasta el día viernes por un periodo estimable de tiempo.

Para esto se utilizaran las siguientes formulas:

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

Ecuación 3

$$TPDS = \frac{\sum TDi}{N^{\circ} \text{ de Dias}}$$

Ecuación 4

Donde:

S: Desviación estándar de la muestra

TDi: tráfico diario del día sondeado

TPDS: tráfico promedio diaria semanal

Estimación de la desviación estándar poblacional σ

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

Ecuación 5

Donde:

N: número de días de un año

n: tamaño de la muestra en número de días de toma de datos

S: Desviación estándar de la muestra

Trafico promedio diario anual TPDA

$$TPDA = TPDS \pm Zc\sigma$$

Ecuación 6

Donde: σ : Desviación estándar poblacional

Zc: número de desviación estándar correspondiente al nivel de confiabilidad

En la distribución normal, para niveles de confiabilidad del 90% y 95% los valores de constante Z_c son 1.64 y 1.96 respectivamente. (MTOP, NEVI-12 Volumen 6, 2012)

2.6 Diseño de mezcla asfáltica en caliente

Para la realización de la mezcla asfáltica se toma como base el cálculo del TPDA, mediante el cual se estima el tráfico vehicular que circula por esta vía. La tabla 2 detalla la clasificación de las vías, siendo este el primer parámetro para el diseño de la nueva mezcla asfáltica.

Este parámetro para el diseño se toma en cuenta debiéndose a que existen vías que rebasan la barrera de los 80,000 vehículos diarios (TPDA), existiendo un número significativo de accidentes de tránsito y además, por diversos estudios que se realizaron en donde se comprobó que el parque automotor ha crecido consistentemente a una tasa promedio simple durante los últimos 14 años en el orden de 6% anual. (MTOP, NEVI-12 Volumen 6, 2012).

2.6.1 Hormigón asfáltico mezcla en caliente

Este diseño consistirá en la construcción de la capa de rodadura de hormigón asfáltico de una vía, la cual se constituye por una granulometría determinada, material asfáltico y de ser necesario un relleno mineral. Estos serán mezclados en caliente en una planta central y se colocara sobre una base debidamente preparada o sobre un pavimento ya existente.

Al realizar una estructura vial para tráfico liviano, se podrá utilizar en lo que se refiere a materiales, cemento asfáltico con un grado de penetración 85 a 100. En lo que respecta

a sus agregados a emplearse en el hormigón asfáltico, este podrá estar constituido por roca o grava triturada parcialmente o total, materiales que se hayan fragmentado naturalmente, con relleno mineral o con arenas. Para el diseño de la mezcla idónea para el tráfico anteriormente mencionada nos vamos a referir a la tabla 11, en la cual nos especifica en tamaño de agregado de acuerdo a la granulometría idónea:

Tabla 11
Clasificación de pasante de agregados

TAMIZ	Porcentaje en peso que pasa a través de los tamices de malla cuadrada			
	¾"	½"	3/8"	N°4
1" (25.4 mm)	100	-	-	-
¾" (19.0 mm)	90-100	100	-	-
½" (12.7 mm)	-	90-100	100	-
3/8" (9.50 mm)	56-80	-	90-100	100
N° 4 (4.75 mm)	35-65	44-74	55-85	80-100
N° 8 (2.36 mm)	23-49	28-58	32-67	65-100
N° 16 (1.18 mm)	-	-	-	40-80
N° 30 (0.60 mm)	-	-	-	25-65
N° 50 (0.30 mm)	5-19	5-21	7-23	7-40
N° 100 (0.15 mm)	-	-	-	3-20
N° 200 (0.075 mm)	2-8	2-10	2-10	2-10

Fuente: (MOP F-001, 2002)

Para realizar la discretización del tipo de mezcla que se va a seleccionar nos guiaremos en la clasificación del tráfico la cual es función de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDP) mediante la tabla 12 se estipularan los rangos admisibles:

Tabla 12
Clasificación de Tráfico por IMPD

TRÁFICO	IMPD
Liviano	Menos de 50
Medio	50 a 200
Pesado	200 a 1000
Muy Pesado	Más de 1000

Fuente: (MOP F-001, 2002)

Detallando de forma similar en la tabla 13 los tipos de mezclas para el tratamiento y cantidades aproximadas por metro cuadrado utilizando emulsiones asfálticas.

Tabla 13
Tratamiento y Cantidades de material por m² de emulsión asfáltica

Tipo de Tratamiento	Agregado en kilogramos						Emulsión en litros
	A	B	C	D	E	F	
TSB-1 Capa única						14-16	1.4-2.0
TSB-2A Primera Capa Segunda Capa				11-14		8-11	0.9-1.6 0.7-1.1
TSB-2B Primera Capa Segunda Capa			14-16			8-11	1.4-2.0 0.7-1.1
TSB-2C Primera Capa Segunda Capa		22-27		11-14			1.8-2.3 0.9-1.6
TSB-3 Primera Capa Segunda Capa Tercera Capa	15.18	7-9		5-6			0.9-1.4 1.6-2.3 1.1-1.6

Fuente: (MOP F-001, 2002)

2.6.2 Principios y consideración para una mezcla asfáltica

Para considerar una preparación de una mezcla asfáltica se deben establecer criterios de acuerdo a las especificaciones técnicas que rijan el proyecto.

- Porcentaje de vacíos de aire en la mezcla
- Porcentaje de vacíos llenados con el asfalto
- Porcentaje mínimo de vacíos en el agregado mineral
- Valor mínimo de la estabilidad
- Rango de valores límite de fluencia

Estos criterios se tomarán en cuenta a los valores establecidos en la tabla 5 el cual nos estipula los rangos para tráfico liviano, mediano, pesado o muy pesado. Es necesario de manera previa analizar la susceptibilidad de la mezcla con respecto al agua, para poder determinar su comportamiento en relación al desplazamiento que se puede producir en relación a la película de ligante por el agua. Ya que este depende del porcentaje de vacíos de aire, a través de los cuales la humedad debe ser secada. (UMSS, 2012)

Mediante estudios se ha comprobado que el porcentaje de asfalto óptimo se encuentra en un 6% con referencia al peso de los agregados pétreos, ya que mayores porcentajes requerirán de una verificación cuidadosa del diseño de la mezcla. (UMSS, 2012)

2.6.3 Fórmula maestra de obra

La formulación de esta ecuación se desarrolla en base al estudio de los materiales que se proponen utilizar en el trabajo. Donde la fórmula maestra establecerá los siguientes puntos:

- Las cantidades de las diversas fracciones definidas para los agregados
- El porcentaje de material asfáltico para la dosificación, en relación al peso total de todos los agregados, inclusive el relleno mineral y aditivos para el asfalto si se los utilizase.
- La temperatura que deberá tener el hormigón al salir de la mezcladora
- La temperatura que deberá tener la mezcla al colocar en sitio

2.6.4 Método Marshall para diseño de pavimentos

El manejo de esta metodología, es solo aplicable a mezclas asfálticas en caliente para una combinación determinada de agregados. Brindando información sobre parámetros de estabilidad y flujo de las diferentes mezclas en caliente, estableciendo densidades y contenidos óptimos de vacíos que se deben cumplir para las especificaciones de la obra.

La estabilidad representa la resistencia estructural de la mezcla compactada y como está afectada principalmente por el contenido de asfalto, el tipo de agregado y como este afecta en su composición granulométrica. Es decir la estabilidad es un índice de calidad de los agregados. Al referirnos del flujo este representa la fluidez necesaria que debe tener una mezcla para su correcta compactación, a la densidad exigida y producir una textura superficial apropiada. (UMSS, 2012)

Se debe tomar en cuenta que el material pétreo debe encontrarse a una temperatura de 140 o 150 °C y el cemento o ligante asfáltico a una temperatura de 110 a 130 °C para la correcta mezcla de ambos componentes. La mezcla terminada se deberá extender en capas de manera uniforme con los espesores y anchos estipulados, y posteriormente ser

compactadas a temperaturas superiores a los 90 °C. Para su correcta funcionalidad un concreto asfáltico debe cumplir con los siguientes objetivos:

- Suficiente estabilidad en la mezcla y de esta manera satisfacer las necesidades de servicio y demandas del tránsito sin que ocurran desplazamiento o distorsiones.
- Debe tener suficiente asfalto para certificar un pavimento durable, resultante de la cobertura total de los agregados pétreos, ligando de manera adecuada entre partículas, e impermeabilizando bajo una compactación adecuada.
- Suficiente trabajabilidad y de esta forma permitir una mayor eficiencia operacional en la fabricación de la mezcla y su compactación.
- La presencia de una cantidad aceptable de vacíos en la mezcla compactada, y de esta manera proveer una reserva que impida, al producirse una pequeña compactación adicional.

Los criterios para alcanzar unas mezclas satisfactorias se establecen en requisitos mínimos de fluencia, densidad, estabilidad y porcentaje de vacíos. Al utilizar este modelo se determinan procesos para la realización de ensayos de estabilidad y flujo de mezclas preparadas en caliente, además de determinar las características físicas y analizar los diferentes parámetros que definen el contenido de asfalto necesario para la estructura vial.

Este valor representa la deformación producida en sentido del diámetro del espécimen antes que se produzca su fractura. Es decir este valor es un indicador para alcanzar la condición plástica y por consiguiente de la resistencia que ofrecerá la carpeta asfáltica bajo la acción de cargas que por ella circulen.

2.6.4.1 Estabilidad y flujo en pavimentos flexibles

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones. Depende de la “Fricción Interna” y unión entre agregados. Fricción Interna (ϕ): Depende de la textura superficial, forma de los agregados, densidad de la mezcla, granulometría y cantidad de asfalto. (Zuñiga, 2015)

En la mayoría de proyectos viales, la temperatura es uno de los factores a los que menos atención se le presta, particularmente durante la compactación de la mezcla asfáltica. Sin tomar en cuenta que la temperatura de la mezcla al inicio es inferior a la recomendada por las especificaciones, dando como resultado una mezcla difícil de compactar, la que demanda a su vez mayor energía de compactación para obtener valores aceptables de densidad. (Meléndez, 2006)

Al tomar en consideración lo anteriormente mencionado, nos da como resultado microfisuraciones en la carpeta asfáltica, produciendo valores bajos de estabilidad en la mezcla. El instituto del asfalto recomienda rangos de temperatura para compactar entre 325 °F – 185°F (163°C – 85°C), sin embargo, agrega que la mejor temperatura para iniciar la compactación deberá ser la máxima temperatura a la cual la mezcla pueda soportar las acciones de la compactación sin que sufran desplazamientos horizontales. (Meléndez, 2006)

2.7 Sistema de aeronaves no tripuladas (UAV)

Para hacer referencia a la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), se tomara como termino referencial UAS (sistema de aeronaves no tripuladas), a diferencia

de la UAV (Vehículo aéreo no tripulado) con el cual se reconocía al sistema anteriormente mencionado. Como se presenta en la figura 19.

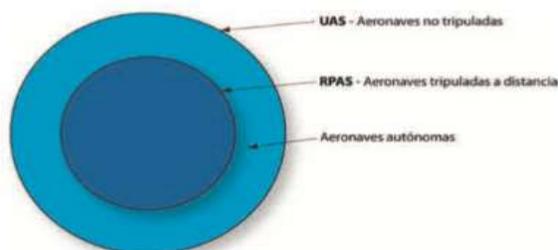


Figura 19 Clasificación UAS/UAV

Donde se puede definir, que las aeronaves tripuladas o no tripuladas son consideradas de la misma forma, y por lo tanto se sujetaran a las reglas y condiciones que las aeronaves tripuladas. De manera general la utilización de este tipo de aeronaves autónomas es la de plantear situaciones de gran relevancia para garantizar la seguridad (como prevenir accidentes) y de manera conjunta asignar responsabilidad en caso de desarrollarse algún accidente. (Madrid, 2015)

2.7.1 Aplicación de los sistemas de aeronaves no tripulados (UAV/UAS)

La utilización de esta tecnología se remonta desde la época de los 40 en donde se desarrollaron los primeros vehículos no tripulados, con fines militares como medios de recolección de información. Con el paso del tiempo este tipo de vehículos tuvieron un mayor avance tecnológico como un área mayor de demanda, desarrollo, y utilización. Estos ya no se monopolizaban solo en el área militar, sino tomaron importancia en el área civil, en donde tuvieron un uso mayor en distintas áreas de aplicación las cuales se detallaran en la figura 20.

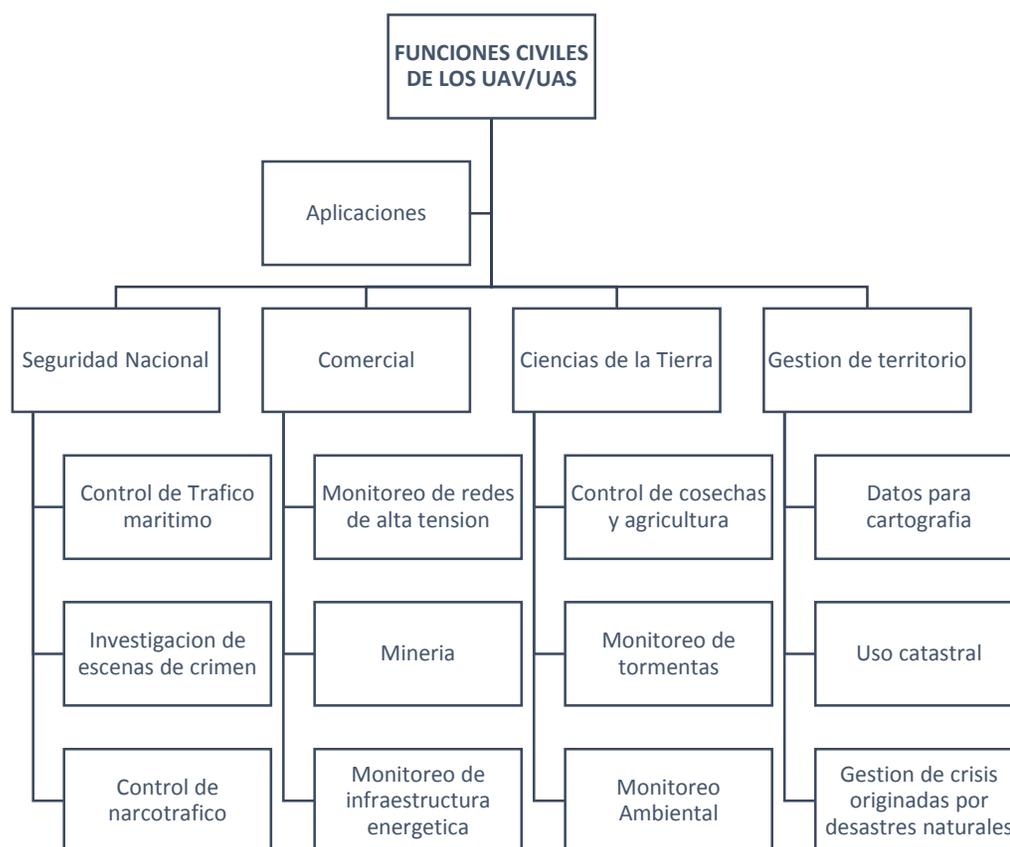


Figura 20 Aplicaciones de la tecnología UAV/UAS

Además de las aplicaciones mencionadas en la figura 20 se han desarrollado muchas más entre estas se puede mencionar el uso para realizar un levantamiento orto fotográfico de vías, taludes, caminos que anteriormente estaban relativamente inaccesibles, ya que se dificultaba el acceso del personal técnico y aún más el ingreso de maquinaria, para realizar el trabajo que estos vehículos ahora ejecutan, con menores riesgos y en menor tiempo.

2.7.2 Imágenes ortodigitales

Como característica principal, este tipo de fotografías implementa imágenes en formato digital, mediante el uso de medios aerotransportados para efectuar estudios en el ámbito

civil. Esta tecnología ha desarrollado gran expectativa para emplear sus imágenes en reconstrucciones dinámicas además de generar actualizaciones de áreas urbanas y rurales. Esto despertó un mayor interés en obtener representaciones de terrenos en menor escala, impulsando el desarrollo de técnicas de fotointerpretación y teledetección. Las imágenes obtenidas por fotografías aéreas, a las cuales se le han procedido a remover sus principales distorsiones ya sean estas geométricas o de otro tipo de corrección, mediante un procedimiento denominado “ortofoto convencional”, es un proceso para entregar un beneficio de carácter métrico a escala homogénea en toda su extensión, permitiendo percibir los objetos de manera directa.

En la actualidad se ha ido desarrollando de manera común la utilización de sistemas aerotransportados para la realización de trabajos de topografía, cartografía, entre otros. Siendo las fotografías aéreas útiles en la cartografía solamente las tomadas de manera vertical (eje de la cámara dirigido directamente al centro de la Tierra), y tomándolas de manera sucesiva a lo largo de la línea de vuelo sobre la zona de estudio. Es por tal motivo que hoy en día se han dejado de lado los procedimientos analíticos, dando paso a los sistemas de fotografía aérea mediante sistemas de captación de imágenes digitales es decir las plataformas aerotransportadas (UAV/UAS).

2.7.3 Aplicaciones cartográficas y desarrollo digital

A modo de conocimiento la cartografía es una técnica para el análisis, la interpretación y representación gráfica parcial o total de toda una superficie de un astro. Desde los tiempos antiguos se han elaborado cartografías de terrenos para poder simplificar los elementos que intervienen. Esto ha conllevado que hoy en día exista una demanda y

disponibilidad de datos mayor, por lo que se hace necesario obtener datos en una escala de tiempo y espacios reducidos. (Madrid, 2015)

Es vital recordar que las cartografías pasaron de papel a cartografías digitales, brindándonos esto una idea amplia de cómo la tecnología se ha ido desarrollando. Los sistemas UAS/UAV (sistema de aeronaves no tripuladas) comúnmente conocidas como Drones, en los últimos años se han convertido en la herramienta más accesible para obtener información muy útil y eficaz con un ahorro de tiempo muy significativo, además de reducir los costos y generando resultados muy satisfactorios.

Para el manejo de la información se puede emplear programas para la detección conocido como Teledetección, que además de captar imágenes georreferenciadas permite recoger imágenes en diferentes bandas de espectros electromagnéticos. Para la elaboración de esta se puede utilizar una herramienta básica conocida como fotogrametría, la cual permite realizar mediciones sobre fotografías a manera de identificar y caracterizar los objetos presentes en la zona de estudio. De allí la utilización de esta herramienta, ya que nos permite obtener información de manera instantánea, además de conocer dimensiones, propiedades entre otro tipo de información acorde a las necesidades del estudio. (Madrid, 2015)

2.7.3.1 Sistemas de geo posicionamiento

Estos sistemas se desarrollan en base al posicionamiento de un objeto, punto de interés y estos pueden ser determinados de las siguientes formas:

- En relación a un sistema de coordenadas, comúnmente se utiliza el tridimensional

- En base a otro punto, el cual se tomara de origen de un sistema de coordenadas locales.

Al primer sistema se lo conoce como posicionamiento absoluto, en cambio el segundo como posicionamiento relativo, tomando en cuenta que si el posicionamiento es estacionario se lo conoce con el término de posicionamiento estático. A diferencia de cuando el objetivo es móvil toma un nombre de posicionamiento dinámico. Al comparar estos sistemas de referenciación se observa que el método estático es generalmente utilizado en la topografía a diferencia del método dinámico el cual se orienta en la navegación.

2.7.3.2 Software fotogramétrico

Para la realización del procesamiento de imágenes se necesita un software fotogramétrico siendo este un paquete especializado, que permite realiza la orientación de las imágenes de manera automática.

PIX 4D:

Uno de los softwares más comercializados, con la adquisición de drones de diferentes marcas entre estos tenemos el más conocido el EBEE, permitiéndonos el manejo de grandes volúmenes de información además de permitirnos generar nubes de puntos y modelos de elevación.

2.8 Espectros de radiación

2.8.1 Radiación solar

La atmosfera terrestre es considerada como una capa fina compuesta por gases, además de un conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol. El sol se encuentra a una temperatura de $5727\text{ }^{\circ}\text{C}$, y a una distancia de $1.496 \times 10^8\text{ km}$ y con un radio de $6.96 \times 10^5\text{ km}$. La energía producida desde el núcleo del sol en forma de rayos gamma de alta energía se convierte a rayos X, al seguir su avance a la superficie se transforma a rayos ultravioleta para finalmente transformarse a irradiación visible de menor energía. Mismos que se detallan en la figura 21.

El sol genera radiaciones a lo largo de todo su espectro electromagnético desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, tomando en cuenta que no toda esta radiación solar alcanza la superficie de la Tierra, ya que estas son disipadas u absorbidas por los diferentes gases presentes en la atmosfera.

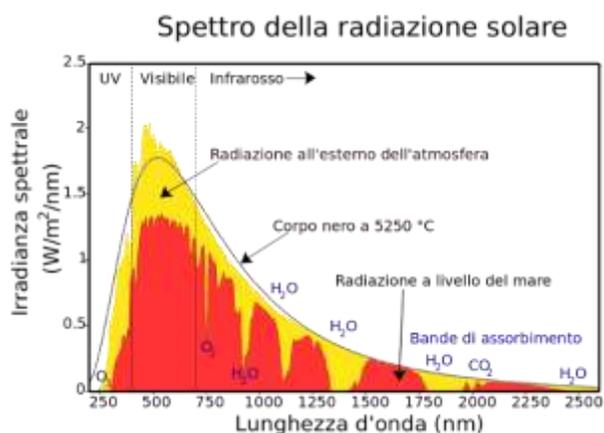


Figura 21 Espectro de radiación solar

La radiación emitida por el sol tiene una potencia de $60\text{MW}/\text{m}^2$, de la cual llega a la superficie terrestre $1367\text{ W}/\text{m}^2$ misma que se distorsiona en la atmósfera terrestre, valor conocido como constante solar (Ics). (World Meteorological Organization, 1981)

2.8.1.1 Irradiancia solar

La irradiación solar es la magnitud que mide la energía por unidad de área de radiación solar incidente en una superficie colocada en un lugar y rango de tiempo bien especificados. La magnitud es frecuentemente designada por los medios de comunicación social como radiación solar. La irradiación solar en la superficie terrestre es, desde el punto de vista técnico, la adición en un intervalo de tiempo determinado de la radiancia solar filtrada por la interposición de la atmósfera. Su valor depende críticamente de la latitud, la época del año, las horas del día y el clima imperante en el lugar (ECYT-AR, 2017)

2.8.2 Radiación ultravioleta

Denominada así a la energía electromagnética transferida en longitudes de onda imperceptible a la visibilidad del ojo humano, pero mayor a la de los rayos X. obteniendo de esta manera en la superficie terrestre espectros UV los cuales constituyen aproximadamente el 7.6% del total del espectro.

Por debajo de $0,4\mu\text{m}$ correspondiente al 9% es la radiación UV. La Radiación Solar UV se divide en 3 partes que son UV-A ($0,32\mu\text{m}-0,4\mu\text{m}$), UV-B ($0,28\mu\text{m}-0,32\mu\text{m}$) y UV-C ($0,2\mu\text{m}-0,28\mu\text{m}$). De esta radiación solo el 98% de UV-A y 2% de UV-B llegan hasta la superficie terrestre a pesar de que la radiación UV-C es la que tiene mayor energía por fotón con más o menos $4,43\text{eV}$ a $12,40\text{eV}$. Atravesar algunos materiales, esto genera

pérdidas de fuerza mecánica, rigidez y otras propiedades. De esta manera permitiendo tener una irradiancia máxima total en el espectro UV (280 – 400 nm) 102.89 W/m², valor óptimo tomando en cuenta las pérdidas que se originan al entrar en contacto con la superficie terrestre. (Gueymard, 2004)

2.8.3 Sensor de radiación solar (Piranómetro)

Instrumento usado especialmente en meteorología. Su función principal es medir de manera muy precisa la Radiación Solar que incide sobre la superficie terrestre. Este sensor adquiere la magnitud física de la Radiación Solar y mediante un fotodiodo y una serie de circuitos, convierte esta medida en un nivel de voltaje que expresa la densidad de flujo de esta Radiación Solar que tiene como unidades de medida KW/m². La figura 22 presenta el instrumento utilizado.



Figura 22 Piranómetro

Cuando la luz es muy intensa, se genera el movimiento de varios electrones, formando así una corriente. Mientras no esté bajo los efectos de la luz, se generará una corriente casi imperceptible llamada corriente de oscuridad.

2.9 Técnicas de medida termográfica

2.9.1 Emisividad

El parámetro de objeto con mayor importancia que debe ajustarse correctamente es la emisividad, siendo esta una medida de la cantidad de radiación emitida por el objeto en comparación con la de un cuerpo negro perfecto de la misma temperatura. Los materiales son susceptibles a la emisividad ya que este depende del tipo de material a estudiarse, normalmente los materiales con tratamientos en su superficie presentan emisividad entre 0.1 y 0.95; una superficie completamente pulida se sitúa por debajo del 0.1; en cambio una superficie oxidada o pintada presenta una mayor emisividad. De la misma forma la piel humana que presenta una emisividad entre 0.97 y 0.98. (Tecnología FLIR, 2017)

2.9.2 Espectro electromagnético

Los espectros electromagnéticos se dividen arbitrariamente en diversas zonas con distintas longitudes de onda conocidas como “bandas”, que se distinguen por los métodos para producirlos o detectar la radiación. No existe diferencias fundamentales entre las distintas bandas electromagnéticas. Todas ellas son regidas por las mismas leyes y las únicas diferencias son debido a la diferencia en la longitud de onda. Como se observa en la figura 23 (Tecnología FLIR, 2017)

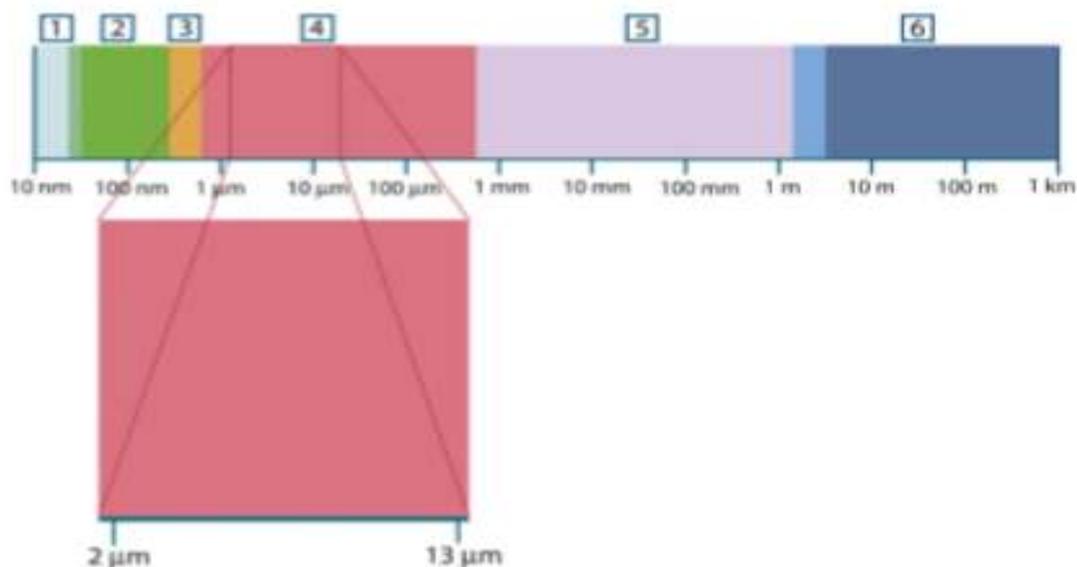


Figura 23 Espectro electromagnético 1. Rayos X 2. UV 3. Visible 4. IR 5. Microondas 6. Ondas de radio

2.9.3 Cámara termográfica

La energía de infrarrojos (A) que irradia un objeto se enfoca con el sistema óptico (B) sobre un detector de infrarrojos (C). El detector envía los datos al sensor electrónico (D) para procesar la imagen. Y el sensor traduce los datos en una imagen (E), compatible con el visor y visualizarle en un monitor de vídeo estándar o una pantalla LCD, como se observa en la figura 24 (FLIR, 2011)



Figura 24 Cámara termográfica

La termografía de infrarrojos es el arte de transformar una imagen de infrarrojos en una imagen radiométrica que reconozca los valores de temperatura. Por tanto, cada píxel de la imagen radiométrica es, de hecho, una medición de temperatura. Por consiguiente, se incorporan complejos algoritmos a la cámara de infrarrojos. Esto hace de la cámara termográfica una herramienta perfecta para el mantenimiento predictivo. Por tal motivo las cámaras termográficas son el complemento perfecto para el estudio y predicción de fallos ya que consiguen hacer visible lo invisible. En una termografía, los problemas sobresalen a la vista de manera inmediata. (FLIR, 2011)

2.10 Sistema eléctrico de monitoreo asistido

2.10.1 Redes de sensores

Es una red de comunicación, conformada por un grupo de pequeños dispositivos con pequeños sensores autónomos con capacidades sensitivas; dichos dispositivos toman el nombre de nodos.

El nodo principal o puerta de enlace, se encarga de extraer la información de los nodos que se encuentran en la red, esta puerta de enlace es la única salida de información hacia la red a la cual se encuentra conectada, es decir que todos los nodos deben tener relación con este dispositivo para poder enviar órdenes y operarlos remotamente (Universidad de Valencia, 2016)

2.10.1.1 Aplicaciones potenciales

En los últimos años se han realizado aplicaciones de estas redes de sensores en áreas de la salud, servicios básicos, monitoreo remoto, aplicaciones militares y ambientales. Algunas de estas aplicaciones son: Monitoreo ambiental de aire, agua y suelo, monitoreo

estructural para edificios y puentes, monitoreo industrial, monitoreo de máquinas, monitoreo de procesos, seguimiento de activos.

2.10.2 Sensor de temperatura

Los sensores de temperatura como su nombre lo indica sirven para medir la temperatura del aire o la temperatura superficial de líquidos y sólidos. Además de existir sensores estándar para el uso industrial. Al igual que el piranómetro, los sensores de temperatura son usados en meteorología, además de muchas otras aplicaciones en la industria. Se encargan de medir de forma precisa la temperatura de la zona donde se instala. Estos sensores suelen estar recubiertos de materiales muy conductores de temperatura para captar mejor esta variable.

Existen 3 tipos de sensores de temperatura, los cuales son: RTD, Termopares y Termistores.

RTD: Este se basa en la variación de su resistencia dependiendo de la temperatura a la que sea sometido. El material más común para su fabricación es el platino, pues este es un material que tiene una gran linealidad de Temperatura contra Resistencia, detecta los cambios de temperatura más rápido y además tiene un margen mayor que cualquier otro.

Termistor: Al igual que las RTD's, los termistores son sensores resistivos que varían su resistencia de acuerdo a los cambios de temperatura que detecte.

2.10.3 Sistema de monitorización

Un Sensor o Sistema de Monitoreo, es un dispositivo o conjunto de dispositivos que se encuentra en la capacidad de tomar variables físicas o químicas con una determinada magnitud, para luego convertirlas en variables de tipo eléctricas como por ejemplo resistencia, corriente, voltaje, entre otras.

CAPITULO III

3 Metodología

3.1 Descripción del área de estudio

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE situada en la Parroquia de Sangolquí, Cantón Rumiñahui es una de las principales instituciones educativas del Ecuador, por lo cual constituye un eje fundamental en el ámbito educativo para la formación de profesionales. (Ver figura 25)



Figura 25 Universidad de las fuerzas armadas ESPE

Geográficamente la universidad de las fuerzas armadas ESPE se encuentra en las coordenadas mismas que se detallan en la tabla 14:

Tabla 14
Coordenadas de ubicación ESPE

Coordenadas	
Geográficas	0° 18' 52.1352" S
	78° 26' 37.5216" W
UTM WGS84	784548.85 m E
	9965173.75 m S

El vigente estudio se enfoca en la elaboración de espectros de temperatura, los cuales brindaran un estudio detallado del comportamiento de los pavimentos flexibles en su capa de rodadura en la zona de estudio descrita anteriormente.

3.1 Levantamiento ortodigital mediante tecnología UAV/UAS

3.1.1 Características ambientales registradas

Para la realización del vuelo se optó por realizarlo el sábado 22 de julio de 2017, teniendo en consideración que durante los días laborales, existe gran presencia de vehículos, además de los estudiantes y el personal administrativo que labora en las instalaciones, generando una pérdida de información, ya que obstaculizan la visión de las fallas presentes en la capa de rodadura del pavimento.

Otra condición definida para el estudio fue realizarla en la mañana, tomando en consideración el día solar presente en la zona de estudio, cuando las condiciones ambientales fueron consideradas como optimas, con el propósito de realizar la toma de fotografías durante el periodo Golden Hour, en donde existe menos presencia de sombras y de nubes. De igual manera se utilizó las apps Golden Hour Calculator y tiempo en vivo

para el registro del periodo de toma de fotografías y las características ambientales, mismas que se especifican en la tabla 15

Tabla 15
Características ambientales

Características Ambientales	
Temperatura	11.5 °C
Precipitación	0 mm
Nubosidad	Parcialmente nublado
Viento	16 km/h
Hora de inicio	9:00
Duración	4 horas

3.1.2 Sistema de monitorización

Para la ejecución de la cobertura del anillo vial dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, el proyecto consta con 12 misiones repartidas en las inmediaciones del área de estudio, el vuelo se lo realizó el día sábado 22 de julio de 2017, iniciándose desde la entrada principal de la Institución, el tamaño deseado del pixel para este proyecto es de 1 cm siendo este el ancho promedio de las fallas, medido en campo, por lo tanto la altura de vuelo teórica fue de 25 m. Esto debiéndose a los obstáculos que se presentan en la zona de estudio, siendo estos árboles o edificios, se seleccionó una altura de vuelo de 50 m con la que se logró generar una orto imagen con el pixel deseado en el programa Pix4D. La tablas 16 detalla las características del vuelo.

Tabla 16*Características de vuelo en zona de estudio*

Características de vuelo	
Drone	Phantome 3 Advance
Unidades	Métricas
Tipo de misión	Grid
Total, de misiones	12
Área total	48 ha
Área del circuito	5.5 ha
Traslapo longitudinal	80%
Traslapo Transversal	70%
GSD Calculado	2.13 cm
GSD Generado en Pix 4D	1 cm
Velocidad	3.9 m/s
Numero de fotos	538

3.1.3 Puntos de control en zonas de falla

Con el propósito de focalizar el estudio se escogió zonas de estudio dentro del circuito cerrado en las cuales existen las fallas más representativas, resultando en total 7 zonas donde se realizó una mejora de la imagen mediante un segundo vuelo fotogramétrico con los siguientes parámetros descritos en la tablas 17.

Tabla 17
Segundo vuelo en zonas de falla

Característica de vuelo	
Traslapo Longitudinal	80%
Traslapo Transversal	70%
GSD Calculado	0.85 cm
GSD Generado en Pix 4D	0.8 cm
Altura de vuelo	20 m
Velocidad	3.7 m/s
Numero de fotos	32

3.1.4 Toma de puntos de control

3.1.4.1 Método fast static

Distancia entre RV hasta 20 km, aunque pueden ser mayores con tiempos de observación extendidos y con algunas refinamiento en el post procesos (con métodos estáticos clásicos se pueden calcular Base líneas de miles de km). Esta técnica es muy adecuada para la aplicación de corto alcance, como la densificación de control y estudio de ingeniería, o de cualquier trabajo donde muchos puntos deben ser objeto de reconocimiento. (Departament d'Enginyeria del Terreny, 2012)

Posicionamiento

Se eligió este método, tomando la consideración de que no se cuenta con una estación de monitoreo continuo cerca, siendo el objetivo del proyecto ubicar en el espacio fallas que tienen un ancho de 1 cm.

Procedimiento

- Se determinaron 22 puntos de control a lo largo del circuito cerrado de los cuales se tienen 2 por cada misión de vuelo.

- Se rastreó durante un periodo de 5 minutos, ya que la precisión que busca es de 1 cm.

- Se utilizaron dos antenas para este proceso, con el fin de ubicar un punto en cada vía

Las coordenadas de los puntos de control fueron procesados en el software comercial Trimble Bussiness Center, mismos que se detallan en la tabla 18.

Tabla 18
Coordenadas puntos de control

N° de Puntos	Latitud	Longitud	Altura
1	-0.31485054	-78.4467864	2513.005
2	-0.31432212	-78.4471005	2513.346
3	-0.31309723	-78.4435541	2513.178
4	-0.31255896	-78.444295	2527.779
5	-0.31184586	-78.4463952	2517.882
6	-0.31197063	-78.44634	2517.622
7	-0.31505896	-78.4431498	2524.564
8	-0.31616146	-78.4435305	2527.121
9	-0.31883756	-78.4431498	2519.835
10	-0.31816332	-78.4465051	2519.462
11	-0.31696509	-78.4465221	2513.036
12	-0.3147434	-78.4466368	2513.546
13	-0.31428195	-78.4469442	2512.899
14	-0.31328978	-78.4435199	2523.567
15	-0.31263889	-78.4444206	2528.331
16	-0.31192523	-78.4456454	2523.321
17	-0.31506817	-78.4430169	2526.711
18	-0.31605449	-78.4433239	2526.931
19	-0.31873433	-78.4450616	2521.868
20	-0.31901174	-78.4457405	2522.031
21	-0.31696503	-78.4466921	2513.515
22	-0.31488993	-78.4463231	2522.98

La línea base con menor precisión fue de 1.4 cm. Ya obtenido los puntos de control terrestre y las ortofotos del vuelo fotogramétrico con dron, estos se usaron para la creación del ortomosaico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE con el software Pix 4D.

3.2 Medidas termográficas

3.2.1 Equipo termográfico “calibración”

Las cámaras termográficas miden perfiles de temperatura que mapean la distribución superficial de la temperatura del objeto, antes de poder utilizar este mapeo, se debe estar al tanto de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la cámara, es decir la cámara debe estar calibrada. Para la calibración de este tipo de dispositivos, por lo general se utilizan técnicas que involucran mecanismos de cuerpo negro disponibles en el mercado con emisividad de 0.99 mismos que suelen ser voluminosos, pesados y costosos. (Mejia, 2014)

La calibración de la cámara garantiza que cada píxel pueda medir las temperaturas con precisión. Se coloca el dispositivo frente a un cuerpo negro con una temperatura de referencia y se comprueba que cada píxel mida exactamente la misma temperatura. (FLIR, 2017)

3.2.1.1 Reconocimiento de patrones

El reconocimiento de patrones es la ciencia que se encarga de la descripción y clasificación (reconocimiento) de objetos, personas, señales, representaciones, etc. Esta ciencia trabaja con base en un conjunto previamente establecido de todos los posibles objetos (patrones) individuales a reconocer. (Ingeniería, 2017)

A continuación en la figura 26 se detalla un diagrama general de un sistema de reconocimiento de patrones, su finalidad es proporcionar una representación de los elementos y como son clasificados.

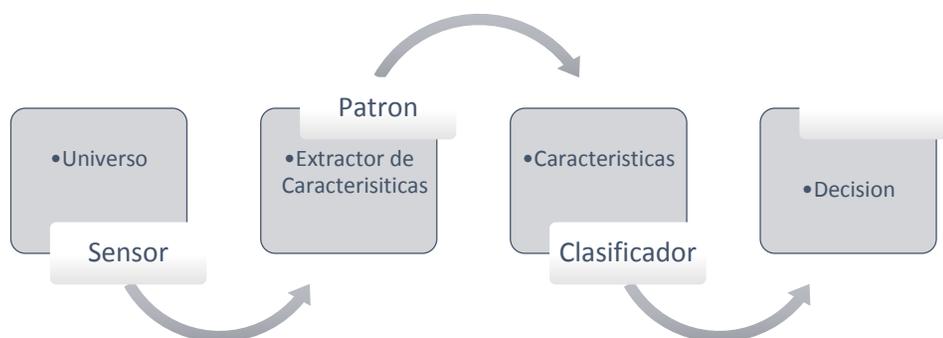


Figura 26 Esquema general de un sistema de reconocimiento de patrones

El objetivo de estas etapas es ajustar el sistema para que sea capaz de clasificar señales u objetos de entrada en una de las variedades predefinidas. Para ello corresponderá analizar un cierto número de características y para poder clasificar satisfactoriamente señales de entrada, es inevitable un proceso de aprendizaje en el cual el sistema crea un modelo de cada una de las clases a partir de una secuencia de entrenamiento o conjunto de vectores de características de cada una de las clases. (Ingenieria, 2017)

3.2.2 Sensor CAT FLIR S60

El teléfono inteligente S60 ha sido diseñado para su uso en exteriores y dispone de características para funcionar en los entornos más exigentes. Equipado con una cámara térmica FLIR integrada, proporciona imágenes térmicas claras y varios sensores de

puntos que le permitirán precisar retroactivamente una temperatura de la imagen, detallado en la tabla 19 las particularidades que presenta.

Tabla 19
Especificaciones de sensor

Cámara Térmica y Visual con MSX	
Sensor térmico	Tamaño de pixel de 17mm Rango espectral de 8 a 14 mm
Resolución Térmica	80 x 60
Resolución Visual	540 x 480
HFOV/VFOV	$46^{\circ} \pm 1^{\circ} / 35^{\circ} \pm 1^{\circ}$
Frecuencia de imagen	8.7 Hz
Enfoque	Fijo 15 mm – Infinito
Integrado en Obturador	Automático / Manual

3.2.3 Captura de videos e imágenes termográficas

Una vez calibrado el sensor termográfico se adaptó la cámara al dron mediante un sistema de soporte y abrazaderas, procediendo a realizar los videos termográficos de la zona de estudio con una altura máxima de 1.80 m ya que esta es la mayor distancia para un óptimo rendimiento del sensor procurando sobrevolar de manera manual las patologías en la vía que deseamos capturar, con las características descritas en la tabla 20.

Tabla 20
Condiciones de vuelo para tomas térmicas

Altura de vuelo máxima	1.80 m
Velocidad	0.3 m/s
Inclinación	90° radial
Hora de vuelo	8 y 10 de la mañana

3.3 Variación climática y radiación solar en zona de estudio

3.3.1 Condiciones climáticas

La parroquia de Sangolquí, se caracteriza por presentar cambios climáticos muy repentinos, mismos que oscilan desde los 11°C a 21°C, sin embargo se han podido percibir temperatura que han superado los 28°C, y de la misma forma temperaturas que han alcanzado los 9°C, por tal motivo considerar la radiación presente en esta zona es de vital importancia para el investigación. La figura 27 muestra las variaciones climáticas existentes. (Weather Spark, 2018)



Figura 27 Variación climática en Sangolquí

3.3.1.1 Radiación solar

Para la estimación del índice de cambio térmico en la zona de Sangolquí se partió con los datos proporcionados por la estación meteorológica “Weather Station WH Signature Serie 2”, que se presenta en la figura 28, localizada en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



Figura 28 “Weather Station WH Signature Serie 2”

A su vez se estimaran los valores obtenidos por la estación meteorológica, con la irradiancia, dato que se obtiene con el piranómetro, instrumento que nos proporciona de forma numérica como los rayos solares se proyectan a la superficie terrestre. Tomando en cuenta que la radiación solar es uno de los principales agentes para que los pavimentos flexibles a través de su ligante (asfalto) sufran cambios en su estructura.

Al obtener las lecturas proporcionados por el equipo (piranómetro), estas se deben tabular de manera que los valores obtenidos se presentan en función de energía, esto debiéndose a que el quipo utilizado nos brinda valores de irradiancia, los cuales dependen de factores de sitio (región) y a su vez de la localización de la toma de datos.

La comparación de los factores climáticos se relaciona de manera directa en función de energía. Por tal motivo se utiliza el método de Angstrom, que relaciona la irradiancia para obtener energía.

3.3.1.2 Método de Angstrom

El estudio consistió en revisar los datos de brillo solar registrados a partir del mes de julio de 2017. De esta manera proporcionar un límite que estipule las horas de luz solar en la Parroquia de Sangolquí. Los datos proporcionados por la estación meteorológica ubicada en la ESPE son la fuente de información disponible para estimar la radiación solar en el Cantón de Rumiñahui, descartando las estaciones meteorológicas del INAMHI por la distancia a la que se encuentran de la Parroquia de Sangolquí, a su vez se considera la exactitud de los datos al encontrarse en la misma zona de estudio donde se desarrolla la investigación. Se utilizó la ecuación de regresión de Angstrom que relaciona la localidad, el cociente de radiación diaria promedio mensual y la radiación en el límite superior de la atmosfera con la fracción de las horas de luz solar posible. (Angstrom, 1924)

Para este cálculo se utiliza la ecuación presentada a continuación que presenta todos los parámetros anteriormente mencionados.

$$H_o = H_e \left(a + b \frac{n}{N} \right)$$

Ecuación 7

Donde:

Ho: Radiación solar global en la superficie

He: Radiación solar calculada en el límite superior de la atmosfera

n: Heliofanía

N: Duración astronómica del día

a y b: Coeficiente de Angstrom

Los coeficientes a y b utilizados en este estudio se fundamentaron en los calculados en el proyecto “Evaluación de la Radiación Solar en Ecuador” del INAMHI, obtenidos de la información disponible de cuatro estaciones que tenían datos completos de radiación solar y heliofanía en la serie promedio de 1995-2000. De esta manera se obtuvieron como resultado los coeficientes de Angstrom presentes en la tabla 21:

Tabla 21
Coeficientes a y b por Región del Ecuador

Región	a	b
Costa	0.27	0.61
Sierra	0.28	0.45
Oriente	0.22	0.57

3.4 Volumen de tráfico en zona de estudio mediante “TPDA”

Para obtener datos precisos de cómo se desempeña el pavimento en la zona de estudio se realiza un estudio de tráfico, que detalla la cantidad de vehículos que circulan por el circuito vial, y de esta manera observar la cantidad de esfuerzos dinámicos a la que se encuentra sometida.

3.4.1 Tráfico diario (TD)

Como se indica es el número total de vehículos que circulan constantemente en un día, por un punto establecido de la vía, expresado en veh/día. El volumen de tráfico se

determinó directamente del análisis de aforo tomado en el ingreso al anillo vial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para cada día de la semana en la fecha del 6 al 10 de noviembre de 2017, en los horarios de 7:00 a 8:00, y 13:00 a 14:00 consideradas como horas de mayor circulación vehicular, detallado en la tabla 22 los valores obtenidos, y a su vez en la figura 29 presentando un diagrama de comportamiento para los días en estudio.

Tabla 22
Tráfico Diario Semana del 6 al 10 de noviembre

Día	Cantidad de Vehículos
Lunes	671 veh/día
Martes	697 veh/día
Miércoles	689 veh/día
Jueves	661 veh/día
Viernes	638 veh/día



Figura 29 Diagrama de Tráfico Diario Semana del 6 al 10 de Noviembre

De manera similar se continuó con el estudio en la fecha del 13 al 17 de noviembre de 2017, en el mismo horario detallado anteriormente obteniendo los valores presentados en la tabla 23 y de forma similar en la figura 30 representando su comportamiento.

Tabla 23
Tráfico Diario Semana del 13 al 17 de noviembre

Día	Cantidad de Vehículos
Lunes	652 veh/día
Martes	658 veh/día
Miércoles	671 veh/día
Jueves	694 veh/día
Viernes	646 veh/día



Figura 30 Diagrama de Tráfico Diario Semana del 13 al 17 de Noviembre

3.4.2 Tráfico promedio diario anual (TPDA)

Definido como el volumen total de vehículos que transitan por un punto de una carretera durante un periodo de un año. Expresado en vehículos/día. Para realizar el cálculo procederemos con la utilización de las ecuación tres hasta la ecuación 6 respectivamente,

presentadas en el apartado 2.6.2.1, con lo cual se determinara de manera estadística como se presentaría el tráfico en la zona de estudio.

3.4.3 Proyección de trafico futuro (TF)

Para determinar el trafico futuro plantearemos dos métodos de cálculo con lo cual se establecerá un rango mayor de aceptación de los valores obtenidos.

I. Método Creciente Aritmético

$$TPDAf = TPDAo * \left(1 + \frac{i}{100}\right)^t \quad \text{Ecuación 8}$$

II. Método Creciente Geométrico

$$TPDAf = TPDAo * e^{\left(\frac{i*t}{100}\right)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

TPDAf: Trafico proyectado

TPDAo: Trafico correspondiente al año base

i: Índice de crecimiento del tráfico

t: número de años

3.4.4 ESAL de diseño

Mediante el cálculo del ESAL planteado por la normativa AASHTO, se estima el espesor de la carpeta de rodadura, en base al TPDA calculado anteriormente tomando en cuenta los lineamientos que se plantean, siendo este el factor de equivalencia de carga mismo

que se describe en la tabla 24, coeficiente determinante para obtener los resultados esperados.

Tabla 24
Factor de equivalencia de carga

Carga bruta por eje		Factores de equivalencia de Carga		
KN	lb	Ejes Simples	Ejes Tandem	Ejes Tridem
4.45	1,000	0.00002		
8.9	2,000	0.00018		
17.8	4,000	0.00209	0.0003	
26.7	6,000	0.01043	0.001	0.0003
35.6	8,000	0.0343	0.003	0.001
44.5	10,000	0.0877	0.007	0.002
53.4	12,000	0.189	0.014	0.003
62.3	14,000	0.360	0.027	0.006
71.2	16,000	0.623	0.047	0.011
80.0	18,000	1.000	0.077	0.017
89.0	20,000	1.51	0.121	0.027
97.9	22,000	2.18	0.180	0.040
106.8	24,000	3.03	0.260	0.057
115.6	26,000	4.09	0.364	0.080
124.5	28,000	5.39	0.495	0.109
133.4	30,000	6.97	0.658	0.145
142.3	32,000	8.88	0.857	0.191
151.2	34,000	11.18	1.095	0.246
160.1	36,000	13.93	1.38	0.313
169.0	38,000	17.20	1.70	0.393
178.0	40,000	21.08	2.08	0.487
187.0	42,000	25.64	2.51	0.597
195.7	44,000	31.00	3.00	0.723
204.5	46,000	37.24	3.55	0.868
213.5	48,000	44.50	4.17	1.033
222.4	50,000	52.88	4.86	1.22
231.3	52,000		5.63	1.43
240.2	54,000		6.47	1.66
249.0	56,000		7.41	1.91
258.0	58,000		8.45	2.20
267.0	60,000		9.59	2.51
275.8	62,000		10.84	2.85
284.5	64,000		12.22	3.22
293.5	66,000		13.73	3.62
302.5	68,000		15.38	4.05
311.5	70,000		17.19	4.52
320.0	72,000		19.16	5.03
329.0	74,000		21.32	5.57
338.0	76,000		23.66	6.15
347.0	78,000		26.22	6.78
356.0	80,000		29.0	7.45
364.7	82,000		32.0	8.20
373.6	84,000		35.3	8.90
382.5	86,000		38.8	9.80
391.4	88,000		42.6	10.6
400.3	90,000		46.8	11.6

Fuente: (AASHTO, 1993)

Una vez obtenido el factor camión (FC), y determinado el ESAL de diseño nos dirigimos a la tabla 25, que nos estima los rangos de espesor para la carpeta asfáltica de diseño.

Tabla 25
Espesores mínimos sugeridos

Número de ESAL's	Capas Asfálticas	Base Granular
Menos de 50,000	3.0 cm	10 cm
50,000 - 150,000	5.0 cm	10 cm
150,000 - 500,000	6.5 cm	10 cm
500,000 - 2,000,000	7.5 cm	15 cm
2,000,000 - 7,000,000	9.0 cm	15 cm
Más de 7,000,000	10.0 cm	15 cm

Fuente: (AASHTO, 1993)

3.5 Evaluación funcional de pavimento flexible en zona de estudio

Para determinar la funcionalidad de los pavimentos, nos enfocaremos en el Índice de serviciabilidad (Δ PSI), que mide las irregularidades superficiales, deterioros, grietas, ahuellamientos, etc. defectos que influyen de manera directa la estructura del pavimento. Es así que una estructuración insuficiente acortará su vida útil. Por otra parte, los diseños se proyectan para una duración de su estructura llamada horizonte o vida de diseño. Esta condición tampoco será cumplida en la realidad, si el diseño no representa en forma adecuada su entorno y parámetros solicitantes. (Patillo, 2000)

Para determinar el valor de este índice, se utiliza una evaluación más objetiva la cual se realiza mediante la ecuación matemática basada en el inventario de fallas del pavimento, que se encuentra descrita en el apartado 2.5.3, de esta manera obteniendo áreas aproximadas de falla en la estructura vial. (Cossi, 2012)

3.5.1 Detección de patologías estructurales

Para este proceso se contabilizó las áreas afectadas en todo el circuito vial, mediante el reconocimiento de patologías presentadas en el apartado 2.3, a su vez tomando las consideraciones de medición de cada uno de ellas. De esta manera se determina el estado funcional de la carpeta de rodadura existe en la zona de estudio, comprobando si esta cumple con los parámetros de confort y seguridad, parámetros juzgados y calificados por los usuarios.

3.6 Evaluación estructural de pavimento flexible en zona de estudio

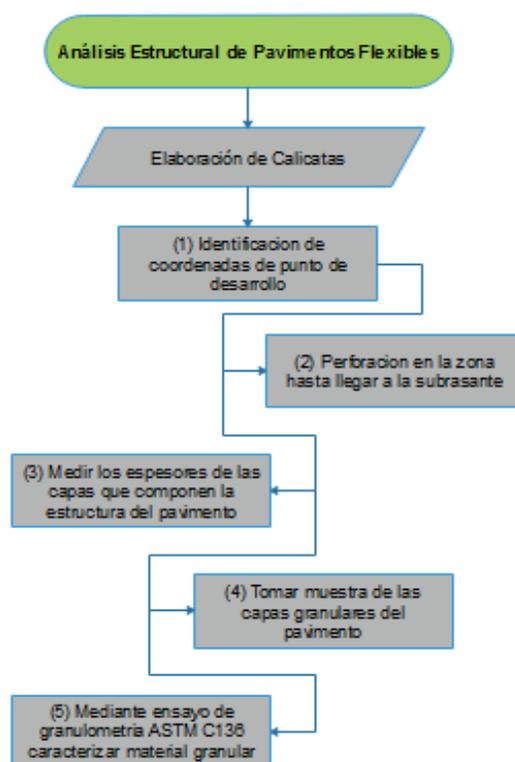


Figura 31. Flujograma proceso de desarrollo de calicatas

Para el estudio del pavimento se procedió a realizar calicatas (Exploración que se hace en firmes de carreteras, para determinar los materiales empleados), que brinden una

apreciación detallada de cómo está constituido el pavimento, como se mencionó en el apartado 2.4. Este proceso se desarrolló con la finalidad, de obtener una visualización directa de los espesores del material granular. Como se observar en la figura 32.



Figura 32 Calicata en zona de estudio

Esta metodología se lo desarrollo en cinco puntos críticos del corredor vial en cuestión, esto se debe a que mediante diferentes perforaciones se puede apreciar si la carpeta de rodadura mantiene su espesor a lo largo de toda su recorrido, además de comprobar si las capas granulares que se encuentran más profundo, cumplen con lo detallado en la normativa vigente de nuestro país MTOP-F001, en relación a bases, subbases, subrasante y carpeta de rodadura.

3.6.1 Caracterización de material granular

Para caracterizar el material existente en la zona de estudio, se procede a recolectar aproximadamente 5000 gr de material granular, por cada punto realizado. Para la ejecución de este procedimiento nos regiremos a la normativa ASTM C136 (granulometría de material granular)

3.6.1.1 Subbases granulares

Para comprobar que existe una subbase granular se realizara el ensayo mencionada en el inciso 3.6.1, a su vez se realizara una descripción visual en campo de cada una de las calicatas, esto se desarrollará con la finalidad de comprobar si existe una composición granulométrica, a su vez esta se comprobara en laboratorio y se realizara una comparación con las fajas granulométricas de caracterización de subbases mencionada en el apartado 2.3.2.

3.6.1.2 Bases granulares

De manera similar a lo mencionado anteriormente se realiza una inspección visual de la composición granulométrica de las calicatas realizadas, e identificar si existe presencia de material granular que pueda describir una base. A su vez se realizara el ensayo granulométrico, que servirá para corroborar que el agregado existente cumpla con las fajas mencionadas en el apartado 2.3.3.

3.6.1.3 Granulometría ASTM C136

Este ensayo describe el procedimiento para conocer la gradación de materiales que serán usados como agregados. Esta clasificación nos permite determinar la distribución de las partículas según su tamaño nominal, misma información es verificable además de proporcionar datos necesarios para la producción de mezclas asfálticas, o a su vez caracterizar material existente.

Materiales y equipos

- Balanza de precisión de 0.1 gr

- Tamices de malla cuadrada
- Tamizador eléctrico
- Horno, temperatura uniforme $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230^{\circ}\text{F}\pm 9^{\circ}\text{F}$)

Procedimiento



Figura 33 Tamizado de material granular

Se prepara una cantidad de muestra de agregado grueso y fino seco (5000 gr), y se utilizarán los tamices de malla cuadrada que se detallan en el apartado 2.4.2 y 2.4.3 subbases, y bases granulares con sus dimensiones de tamices descritos en las tablas 1, 4, 5, 6 y 7, para la categorización que presenta la normativa MTOP.

3.6.1.4 Subrasante

Para el dimensionamiento de pavimentos se consideran tres tipos de subrasantes de acuerdo a su capacidad de soporte, los cuales se determinan de acuerdo a los procedimientos normales de los estudios geotécnicos. La tabla 26 presenta los 3 tipos de subrasante en función de sus características en base a la prueba CBR.

Tabla 26
Clasificación de subrasantes

S1	CBR = 5 – 10%
S2	CBR = 10 – 20%
S3	CBR = + > 20%

Fuente: (Departamento de Geotécnica, 2002)

Para comprobar la estabilidad de la subrasante se realizó un ensayo CBR de laboratorio, mediante el cual se permite determinar la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de Humedad y Densidades controladas. Las cuales se observan en la figura 34 tomando como características las planteadas en la tabla 26.

Condición	S1	S2	S3
TERRAPLENES Y PEDRAPLENES	Diagrama: 1 / 0	Diagrama: S-EST 1 / 0	Diagrama: 1 / 0
CORTES	Diagrama: 1 / 0	Diagrama: S-EST 1 / 0	Diagrama: 1 / 0
TERRAPLENES Y PEDRAPLENES	Diagrama: 2 / 0	Diagrama: S-EST 2 / 1	Diagrama: 2 / 1
CORTES	Diagrama: 2 / 1	Diagrama: S-EST 2 / 1	Diagrama: 2 / 1
TERRAPLENES Y PEDRAPLENES	Diagrama: 3 / 0	Diagrama: S-CEM / 1	Diagrama: 3 / 1
CORTES	Diagrama: 3 / 1	Diagrama: S-CEM / 1	Diagrama: 3 / 1

Figura 34. Clasificación de Subrasantes

Fuente: (Departamento de Geotécnia, 2002)

3.6.1.5 Ensayo CBR (California Bearing Ratio) “ASTM D1883”

Para determinar la resistencia a corte de la subrasante del pavimento en la zona, se realizó la extracción de material en cada punto donde se realizaron las calicatas, para esto se efectuó primero un ensayo de compactación de la subrasante y de esta manera determinar la humedad óptima del material para la ejecución el CBR.

Para la realización del ensayo en mención se debe proceder de la siguiente manera:

1. Preparar la muestra con la humedad óptima obtenida en el ensayo de compactación.
2. Realizar la compactación de 3 moldes en tres capas de igual volumen con los siguientes golpes respectivamente 12, 25 y 56 golpes.
3. Colocar los moldes compactados a saturar durante 3 días
4. Medir el esponjamiento del material una vez por día



Figura 35 Moldes en piscina de sumersión

Para la rotura del ensayo del CBR se procederá de la siguiente manera:



Figura 36 Rotura de molde CBR

1. Retirar los moldes del agua y dejarlos escurrir durante 15 min
2. Colocar el molde en el equipo
3. Encerar el deformímetro y dial de carga y deformación
4. Dar carga a una velocidad de 1pulg/min hasta una profundidad de 4pulg
5. Descargar el equipo
6. Tomar las humedades

3.7 Diseño de mezcla asfáltica en caliente

Para el diseño de una mezcla asfáltica se realizan varios ensayos, mediante los cuales se determinan las características y comportamiento del material. Dicha caracterización es fundamental en el diseño, ya que evalúa el desempeño de la mezcla una vez elaborada. La caracterización de los agregados y asfaltos utilizados, se basó en las normativas utilizadas en el país como son: INEN, ASTM, AASHTO, MTOP. La figura 37, presenta los controles que deben cumplir los componentes anteriormente mencionados.

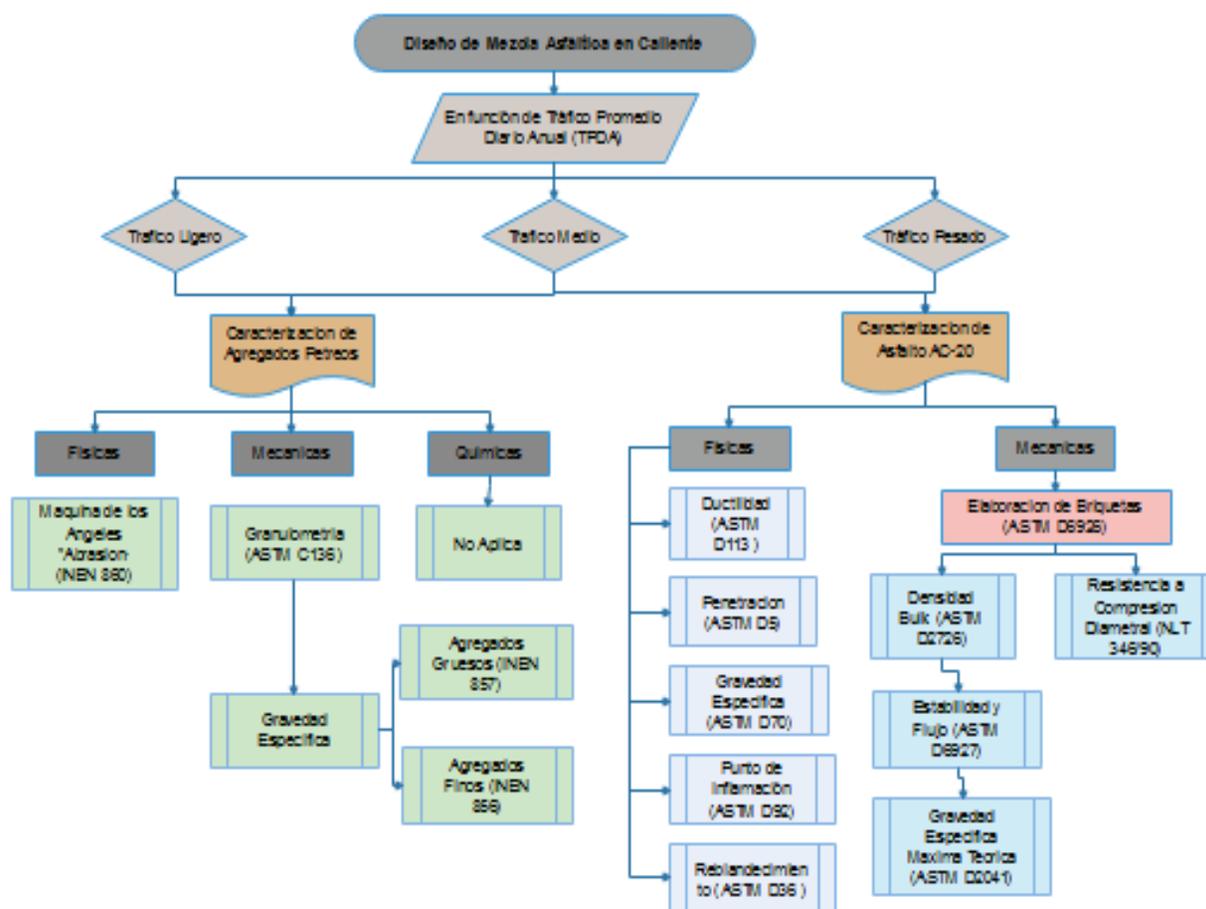


Figura 37 Flujoograma de mezcla asfáltica

Tomando en consideración lo anteriormente mencionado para el diseño del criterio Marshall se opta por la faja de $\frac{1}{2}$ " detallada en el apartado 2.7.1 y describiendo su granulometría de diseño en la tabla 11 planteada por la normativa MTOP F001 la cual rige el diseño en Ecuador, además se toman los criterios de diseño presentados en la tabla 12 detallada en el inciso 2.6.1, que plantea el tráfico para el diseño de la mezcla asfáltica. Tomando las consideraciones planteadas en la tabla 27 y 28, nos regimos para el diseño de la mezcla asfáltica en caliente.

Tabla 27
Criterio de diseño Marshall

TIPO DE TRAFICO CRITERIOS MARSHALL	Muy Pesado		Pesado		Medio		Liviano	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
No. De Golpes/Cara	75		75		50		50	
Estabilidad (libras)	2200	----	1800	----	1200	----	1000	2400
Flujo (pulgada/100)	8	14	8	14	8	16	8	16
% de vacios en mezcla								
- Capa de Rodadura	3	5	3	5	3	5	3	5
- Capa Intermedia	3	8	3	8	3	8	3	8
- Capa de Base	3	9	3	9	3	9	3	9
% Vacios agregados	VER TABLA 405-5.5							
Relación filler/betún	0.8	1.2	0.8	1.2				
% Estabilidad retenida luego 7 días en agua temperatura ambiente								
- Capa de Rodadura	70	----	70	----				
- Intermedia o base	60	----	60	----				

Fuente: (MOP F-001, 2002)

Tabla 28
Tipo de mezcla asfáltica

Tipo de Mezcla	VAM, mínimo (%)
A	16
B	15
C,D	14
E	13

Fuente: (MOP F-001, 2002)

3.7.1 Caracterización de agregados pétreos

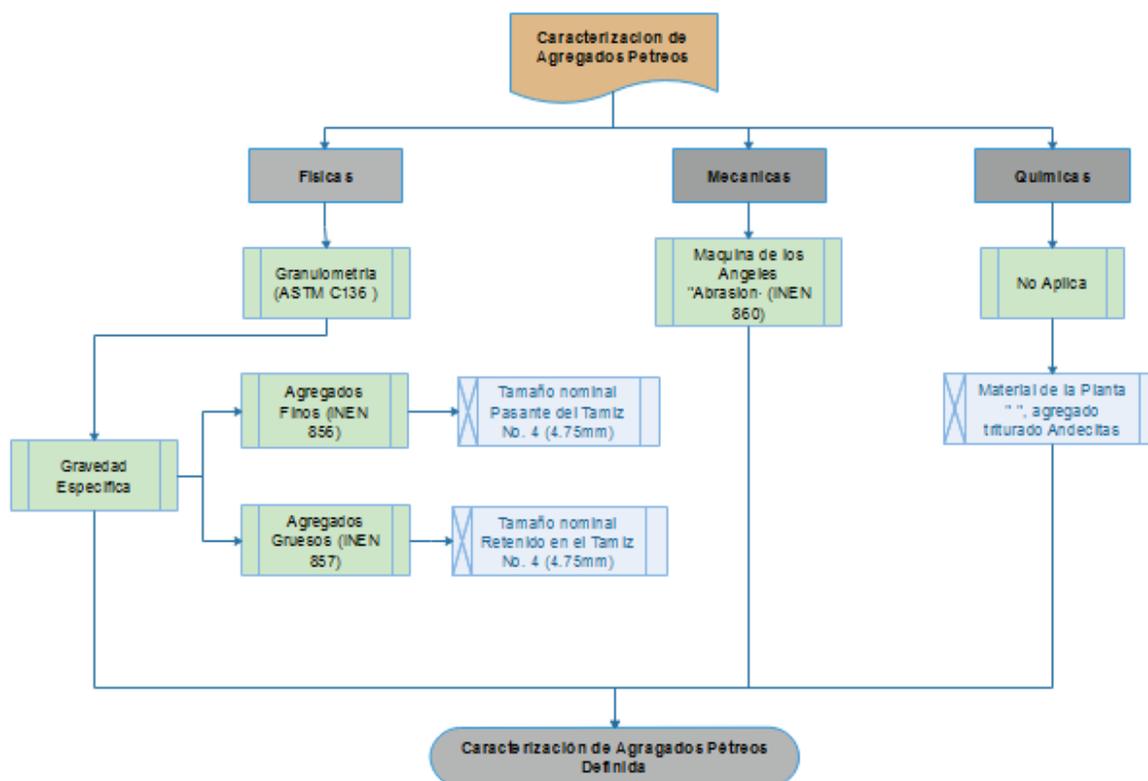


Figura 38 Flujo de agregados pétreos

Como se observa en la figura 38 se debe realizar una caracterización de los agregados que cumplan con las condiciones planteadas en el apartado 2.7.1 detallando la faja granulometría en la tabla 11. Este material procesado debe cumplir con su tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ ".

Los ensayos a realizar a cada una de las proporciones que conforman la mezcla son:

- Granulometría
- Desgaste en máquina de los ángeles, Abrasión
- Gravedad específica y absorción de agregado Grueso
- Gravedad específica y absorción de agregado Fino

3.7.1.1 Desgaste en máquina de los ángeles “Abrasión” INEN 860

El ensayo determina el desgaste del agregado natural triturado inferior a 37.5 mm, que es sometido al choque con esferas de acero, cuyo número de esferas depende de la gradación del agregado. La importancia del ensayo consiste en comprobar la resistencia al desgaste y degradación durante la vida útil del pavimento que deba cumplir con las especificaciones para una mezcla en caliente.

Materiales y equipos

- Agregado grueso de $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$
- Balanza de precisión de ± 0.1 gr
- Horno, temperatura uniforme $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$
- Máquina de los ángeles
- Esferas de diámetro de 46.38 mm y peso 390 gr
- Bandejas

Procedimiento



Figura 39 Máquina de los ángeles

Utilizar el material previamente lavado y secado al horno a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, para evitar la presencia de material fino que pueda afectar con la precisión

del ensayo. Las cantidades de material necesarias para la realización se detallan en la tabla 29.

Tabla 29

Gradación de la muestra de ensayo a la resistencia de abrasión

Abertura de tamices (mm)		Masa (gr)			
Pasante de	Retenido en	A	B	C	D
37.5	25	1250±25			
25	19	1250±25			
19	12.5	1250±10	2500±10		
12.5	9.5	1250±10	2500±10		
9.5	6.3			2500±10	
6.3	4.75			2500±10	
4.75	2.36				5000±10
	Total	5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

Fuente: (INEN 860, 2002)

Tomando las consideraciones de la tabla 30 se determina el número de esferas que deben ser ingresadas en la máquina de los ángeles.

Tabla 30

Número de esferas de acuerdo a su graduación

Gradación	Nro. de esferas	Masa de carga (gr)
A	12	5000±25
B	11	4584±25
C	8	3320±25
D	6	2500±15

Fuente: (ASTM C131, 1990)

Al ser colocadas en la maquina se procede hacer girar el cilindro a una velocidad comprendida entre 188 y 208 rad/min (30 y 33 rpm) las cuales deben completar 500 revoluciones. Además se emplean las ecuaciones que se detallan a continuación:

$$C = A - B$$

Ecuación 10

$$D = (C/A) * 100$$

Ecuación 11

A = Peso del material antes del ensayo

B = Peso del material no desgastado después del ensayo

C = Perdida por desgaste del material

D = Desgaste del material

3.7.1.2 Granulometría ASTM C136

El ensayo describe el procedimiento para conocer la gradación del material que será usado como agregado. Esta clasificación nos permite determinar la distribución de las partículas según su tamaño nominal, información que proporciona datos necesarios para la producción de mezclas asfálticas.

Materiales y equipos

- Balanza de precisión de 0.1 gr
- Bandejas, taras
- Tamices de malla cuadrada
- Tamizador eléctrico
- Horno, temperatura uniforme $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230^{\circ}\text{F} \pm 9^{\circ}\text{F}$)

Procedimiento

Se prepara una cantidad de muestra de agregado grueso seco, como se indica en la especificación detallada en la tabla 31.

Tabla 31
Cantidad de muestra para ensayo granulométrico

Tamaño nominal abertura cuadradas		Masa mínima de la muestra de ensayo	
mm	pul	kg	lb
9.5	3/8	1	2
12.5	1/2	2	4
19	3/4	5	11
25	1	10	22
37.5	1 1/2	15	33
50	2	20	44
63	2 1/2	35	77
75	3	60	130

Fuente: (ASTM C136, 1990)

Para el agregado fino la masa se debe encontrar completamente seca y no debe ser inferior a 300 gr. Se selecciona los tamices necesarios y de esta manera obtener la información necesaria para formular la curva de diseño que cumpla con las especificaciones planteadas.

3.7.1.3 Gravedad específica para agregado grueso INEN 857

Este ensayo consiste en la determinación de la densidad de una porción sólida de agregados pétreos característicos de la muestra de diseño. Se establecen los pesos específicos aparente y nominal, el porcentaje de absorción del agregado con partículas de tamaño igual o mayor a 4.75 mm (Tamiz No. 4), mismos que serán sumergidos por 24 horas en agua.

Al realizar una muestra asfáltica es recomendable realizar este ensayo para todos los tamaños nominales mayores a 4.75 mm que participen en la composición de la nueva mezcla. La tabla 32 detalla las cantidades mínimas para realizar el ensayo.

Tabla 32
Cantidad de muestra por tamaño

Tamaño Máximo Nominal		Cantidad mínima de muestra
mm	Pul.	Kg
12.5 o menos	½	2.0
19.0	¾	3.0
25.0	1	4.0
37.5	1 ½	5.0

Fuente: (INEN 857, 2000)

Materiales y equipos

- Agregado grueso de ¾, ½, 3/8, No. 4
- Balanza de precisión de ± 0.1 gr
- Horno, temperatura uniforme 110° C
- Tamiz No. 4
- Dispositivo de suspensión
- Bandejas metálicas
- Canastilla metálica (Abertura 4.75 mm)
- Tanque de inmersión con apreciación de ± 0.1 gr

Procedimiento



Figura 40 Gravedad específica de gruesos

Se utiliza una cantidad igual o mayor a 2000 Kg de agregado grueso, tamizado por el tamiz No. 4 para separarlo del agregado fino que pueda estar presente, a continuación se procede a lavar la muestra y secarla al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, hasta que su masa se estabilice. Después de este proceso se deja enfriar la muestra y será sumergida en agua por un periodo de 24 ± 4 horas a temperatura ambiente. Al haber transcurrido este tiempo se escurre el agua de la muestra y se procede a secarla con una franela o paño absorbente hasta que el agregado se encuentre en estado superficie saturada seca (SSS), y se pesa la muestra obteniendo una cantidad mínima de 2 kg.

Para estos ensayos se tomó muestra de agregado de los tamaños retenidos en los tamices de: $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", y No. 4. Después de haber sido pesada la muestra se coloca en la canastilla metálica por un periodo de 15 minutos aproximadamente, esperando que se estabilice su valor y se toma el peso sumergido de la muestra colocada en el tanque de inmersión. Para calcular los valores anteriormente mencionados se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$\text{Densidad Relativa (SH)} = \left(\frac{A}{B-C} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\text{Densidad Relativa (SSS)} = \left(\frac{B}{B-C} \right) \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\text{Densidad Relativa Aparente} = \left(\frac{A}{A-C} \right) \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\text{Absorción del Agua \%} = \left(\frac{B-A}{A} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

A = Peso de la muestra secada al horno

B = Peso de la muestra superficialmente seca

C = Peso de la muestra sumergida

3.7.1.4 Gravedad específica para agregado fino INEN 856

Se considera peso específico aparente a la relación existente entre el peso al aire de un sólido y el peso del agua correspondiente a su volumen aparente. La metodología de este ensayo es obtener la densidad de una cantidad de material sólido y representarlo mediante un valor. Estos valores de absorción se determinan para poder establecer los cambios en la masa del árido debido a la cantidad de agua absorbida por los poros de las partículas.

Materiales y Equipo

- Horno, temperatura uniforme 110° C
- Balanza de precisión de ± 0.1 gr
- Tamices de abertura menor al Tamiz No. 4
- Embudo

- Picnómetro
- Pipeta
- Bandejas
- Taras

Procedimiento

Se considera una cantidad de 1000 gr de agregado fino, en este caso se tomara esta cantidad de material retenido en los tamices: No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100, No. 200 y el pasante del tamiz No. 200, como se observa en la figura 41.



Figura 41 Caracterización agregado fino

Al ser tamizada la muestra se la coloca en diferentes recipientes de acuerdo a su tamaño nominal con agua, hasta que cubran la muestra y se la deja durante un periodo de 24 ± 4 horas a temperatura ambiente. Transcurrido este tiempo se escurre el exceso de agua con la precaución de evitar pérdida del material al realizar este proceso.

Se sitúa la muestra en una bandeja esparciendo muy bien el agregado, y se la coloca en un lugar donde reciba luz solar dejándola secar hasta que la muestra se encuentre

con la superficie seca al aire. Al obtener las condiciones óptimas, se tomara una cantidad de 500 gr, la cual será colocada en un picnómetro con una pequeña cantidad de agua destilada. Al ser introducido el material al picnómetro este será colocado en una bomba de vacío, que se encargara de extraer el aire contenido en el recipiente y en los poros del agregado como se observa en la figura 42.



Figura 42 Muestra en bomba de vacío

Terminado el proceso se pesa la muestra, con mucho cuidado se saca el material y este se lo coloca al horno hasta que su masa se estabilice, valor que se utilizara para su posterior cálculo utilizando las fórmulas planteadas a continuación.

$$\text{Densidad Relativa seca al horno (SH)} = \left(\frac{A}{B+S-C} \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\text{Densidad Relativa en condiciones Sat Sup Seca (SSS)} = \left(\frac{A}{B+S-C} \right) \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\text{Densidad Relativa Aparente} = \left(\frac{A}{B+A-C} \right) \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\text{Absorción \%} = \left(\frac{S-A}{A} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

A = Masa de la muestra seca al horno

B = Masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración

C = Masa del picnómetro lleno con muestra y agua, hasta que cubra la muestra

S = Masa saturada superficialmente seca

3.7.2 Caracterización física de asfalto AC-20

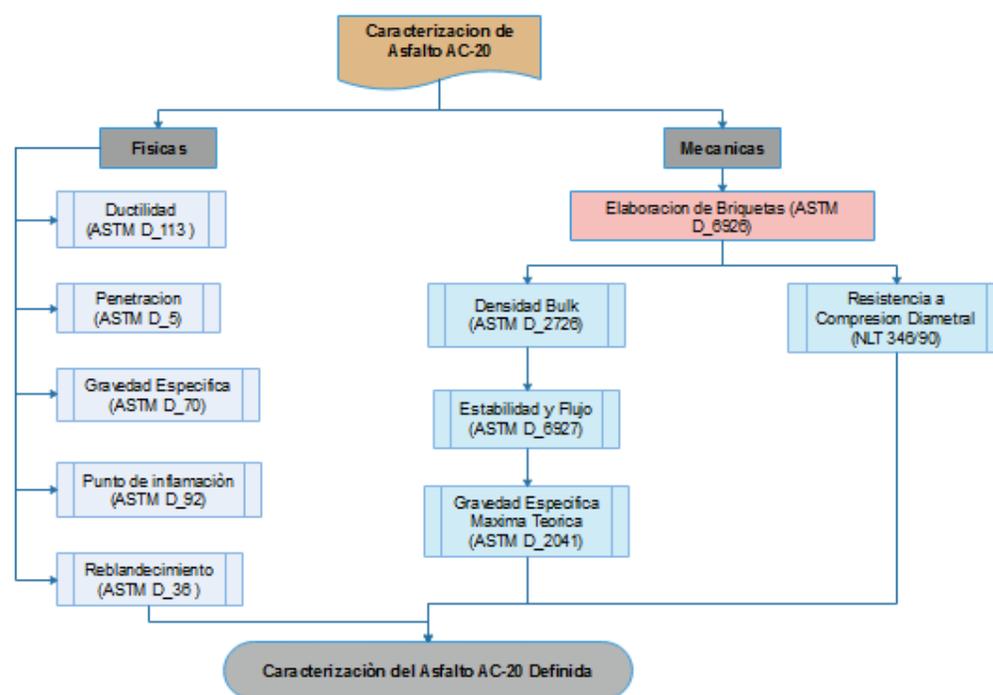


Figura 43 Flujograma asfalto AC-20

Las normativas que se utilizarán para los presentes ensayos son las presentadas en la figura 43 determinados por el Ministerio de transporte y obras públicas (MTO) y adoptadas por todo el país, las cuales determinan los requisitos que deben cumplir los productos asfálticos que se aplicarán en el diseño de pavimentos. Resaltando que el

único asfalto que se produce en el país es el AC-20 y las especificaciones son dirigidas a este tipo.

Las normativas son direccionadas a control de calidad mediante procesos rigurosos, los cuales sirven para evaluar las propiedades, y sus características además de estimar el comportamiento del asfalto en las diversas situaciones a las que será sometido. Para determinarlos se realizaran los siguientes ensayos.

- Ductilidad (cm)
- Penetración, 25°C
- Gravedad Específica
- Punto de inflamación
- Punto de ablandamiento

3.7.2.1 Ductilidad INEN 916/ASTM D 113

La ductilidad del asfalto es la capacidad de un material para admitir grandes deformaciones mecánicas. Se debe tomar en cuenta que cuando la ductilidad es elevada estos son susceptibles a cambios de temperatura. El ensayo consiste en medir la distancia de alargamiento de la muestra de asfalto a una temperatura de 25 ± 0.5 °C hasta que se produzca su ruptura. Como se observa en la figura 44.



Figura 44 Ensayo de ductilidad

Materiales y Equipo

- Moldes de Bronce
- Espátula
- Asfalto AC-20
- Máquina de ensayo de ductilidad
- Baño de agua a 25 °C
- Horno
- Aceite para moldes

Procedimiento

Para empezar el ensayo se debe colocar las piezas del molde previamente engrasadas sobre la placa base, de manera simultánea se debe calentar el asfalto de ser necesario hasta que fluya, colocándolo en forma de chorro fino en los moldes previamente precalentados, tomando la precaución de que las piezas no se muevan o que haya inclusión de burbujas de aire.

Cuando el asfalto esté colocado en su lugar, con la ayuda de una espátula caliente se enrasa el molde. Se introducen las muestras en el baño de agua a temperatura de 25 °C durante un periodo de 85 a 95 min, después retirando las piezas laterales del molde y medir la distancia de rotura del asfalto. Como se presenta en la figura 45.



Figura 45 Rotura de asfalto AC-20

3.7.2.2 Penetración INEN 917/ASTM D5

Este ensayo permite determinar el nivel de dureza del material bituminoso, midiendo la distancia de penetración perpendicular a la muestra en condiciones determinadas de tiempo, temperatura y carga en este caso son 25°C, con 100 gr de peso en un tiempo de 5 segundos. (Ver Figura 46)



Figura 46 Muestra para ensayo de penetración

A demás se toma en consideración lo planteado por el instituto del asfalto quienes han adoptado 4 grados de penetración detallados en la tabla 33, siendo el de menor penetración el de mayor dureza.

Tabla 33
Grados de penetración

	60 – 70
Grado de	85 – 100
Penetración	120 – 150
	200 – 300

Fuente: *Instituto del asfalto*

Materiales y Equipo

- Penetrómetro para asfalto
- Aguja de penetración, vástago y peso
- Horno
- Recipientes cilíndricos
- Termómetro
- Máquina de baño maría
- Contador eléctrico

Procedimiento

Se calentara el asfalto en el horno de ser necesario hasta que este fluya, tomando en consideración de que no exceda los 140 °C para que no presente cambios en las propiedades del material. Se vierte el asfalto en los recipientes tomando la precaución que no ingresen burbujas de aire y evitando que se desborde. Dejar enfriar las muestras

por un periodo de 60 a 90 minutos, transcurrido este tiempo ingresar las muestras en la máquina de baño maría con agua a 25 °C por un tiempo de 60 a 90 minutos. Como se observa en la figura 47.



Figura 47 Muestras en baño maría

Transcurrido el tiempo se sacan las muestras del baño maría en el recipiente de transferencia lleno con agua y se coloca en la plataforma del penetrómetro, se ajusta la aguja hasta que tope la superficie cómo se observa en la figura 48. Y se suelta la misma en un tiempo de 5 segundos

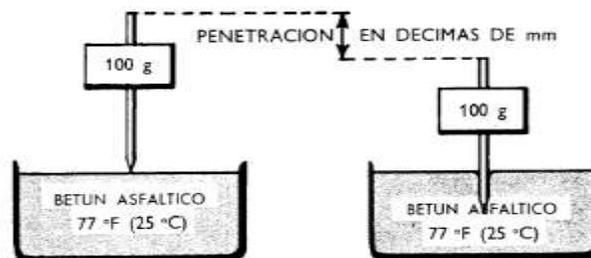


Figura 48 Ajuste de aguja

Fuente: (ASTM D5, 1992)

Tomando en consideración lo siguiente: limpiar la aguja después de cada ensayo con disolvente; la diferencia no debe ser mayor a 4 para penetraciones entre 50 y 149; realizar como mínimo 3 penetraciones por muestra ensayada como se observa en la figura 49.



Figura 49 Ensayo de penetración

3.7.2.3 Gravedad específica ASTM D70

Llamada gravedad específica a la relación que existe entre el peso de un volumen de material bituminoso y el peso de un volumen igual de agua a la misma temperatura en este caso a 25 °C. Para el presente ensayo se realizara el método del picnómetro.

Materiales y Equipo

- Termómetro
- Picnómetro y tapón
- Balanza de precisión de ± 0.1 gr

Procedimiento

Se pesa el picnómetro más el tapón, a continuación se llena el picnómetro con agua hasta la marca de calibración, colocar el tapón, limpiar, secar las paredes exteriores del recipiente y pesar. Con el picnómetro limpio previamente calentado colocar la muestra de asfalto hasta tres cuartos de su capacidad, dejar enfriar la muestra por un periodo de 40 minutos, colocar el tapón y proceder a pesar. A continuación llenar el picnómetro con agua a temperatura del ensayo (25 °C), colocar el tapón, limpiar y secar las paredes exteriores y pesar, tomando siempre la precaución de evitar el ingreso de burbujas de aire al momento de verter el asfalto o el agua, como se muestra en la figura 50.



Figura 50 Muestra de asfalto con inclusión de agua

Para obtener el valor de la gravedad específica se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Gravedad Especifica} = \frac{(C-A)}{(B-A)-(D-C)} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

A= Peso del picnómetro + tapón

B= Peso del picnómetro + agua + tapón

C= Peso del picnómetro + asfalto + tapón

D= Peso del picnómetro + asfalto + agua + tapón

3.7.2.4 Punto de inflamación ASTM D92

Este ensayo nos indica la temperatura a la que puede calentarse el asfalto sin peligro de inflamación en presencia de llama.

Materiales y Equipo

- Termómetro digital
- Copa abierta de Cleveland
- Mechero
- Asfalto AC-20
- Horno

Procedimiento

Se coloca la copa de Cleveland en una superficie recta y firme para evitar movimientos innecesarios; calentar el asfalto hasta que fluya y llenar la copa hasta la marca especificada. De forma simultanea calibrar el mechero para que aumente la temperatura en un rango de 14 a 17°C por minuto. Cuando la temperatura llegue a 28°C por debajo del punto de inflamación esperado, la velocidad de aumento debe ser 5 a 6°C por minuto.

A continuación pasar el aplicador de flama por encima de la muestra en intervalos de temperatura de 2°C, y registrar el valor del punto de inflamación. Como se observa en la figura 51.



Figura 51 Ensayo de inflamación

3.7.2.5 Punto de reblandecimiento INEN 920/ASTM D36

El ensayo determina la temperatura a la cual el asfalto es lo suficientemente blando para que llegue a un estado de fluidez. Este método es utilizado para materiales bituminosos donde su punto de reblandecimiento oscile entre temperaturas de 30 a 200°C.

Materiales y Equipo

- Dos anillos de latón
- Guías de centrado
- Matraz de precipitado de 1000 ml
- Mechero de gas y soporte
- Esferas metálicas

- Hielo
- Termómetro
- Asfalto AC-20
- Horno
- Espátula

Procedimiento

Se debe ajustar la intensidad del mechero para que su temperatura aumente en un rango de 5 °C por minuto. A continuación se debe calentar el asfalto hasta que este fluya y posteriormente se colocara en los anillos de latón previamente calentados y aceitados, dejar enfriar por un periodo de 30 minutos y engrasar con una espátula caliente.

Llenar el matraz de vidrio con agua a temperatura de 5 °C, (utilizar hielo de ser necesario) y mantener esta por un periodo de 15 minutos. Al haber transcurrido este tiempo colocar el equipo en el mechero y anotar la temperatura registrada por el termómetro cuando las esferas metálicas toquen la placa inferior de las guías de centrado. Es importante recordar que la temperatura no debe exceder el 1 °C hasta que ambas esferas toque la placa. Como se observar en la figura 52.



Figura 52 Ensayo de reblandecimiento

3.7.3 Caracterización mecánica de asfalto AC-20

La realización de esta caracterización se enfoca en la composición de una nueva muestra asfáltica que nos permitirá determinar su fórmula maestra de estabilidad.

3.7.3.1 Estabilidad granulométrica

Para la aplicación del método Marshall es de vital relevancia trabajar con una correcta granulometría que garantice mejores costos y calidad. La correcta gradación de los materiales pétreos depende de dos parámetros que son: el tamaño máximo nominal y las líneas de fajas de control superior e inferior. Siendo estas líneas los puntos de paso obligatorio para la curva granulométrica. Se toma la faja de diseño para las briquetas la detallada en la tabla 34.

Tabla 34
Estilización granulométrica

Tamices	Porcentajes que pasa		
	Min	Máx.	% promedio pasa
3/4 " (19,0 mm)	100	100	100
1/2"(12,5mm)	90	100	95
3/8 " (9,51 mm)	67	87	77
No. 4 (4,76 mm)	44	74	59
No. 8 (2.36 mm)	28	58	43
No. 16(1,18 mm)	20	46	33
No. 30(0,6 mm)	13	33	23
No. 50(0,30mm)	5	21	13
No. 100(0,15 mm)	4	16	10
No. 200(0,075 mm)	2	10	6

3.7.3.2 Elaboración de briquetas ASTM D6926

El diseño de los ejemplares considera las dimensiones estándar que son de 101.6 mm (4") de diámetro y 63.5 mm (2" 1/2"), serán elaboradas con la gradación específica de diseño en nuestro caso con la faja de 1/2"; y con cinco distintos porcentajes de asfalto que van desde el 5% hasta el 7% con incremento de 0.5% entre ellos. Este proceso tiene como finalidad generar puntos suficientes en las curvas de análisis que permitirán identificar el porcentaje óptimo de asfalto. Se deben elaborar un mínimo de 3 muestras por cada porcentaje. Como se observan en la figura 53.



Figura 53 Agregados para la briqueta

Las muestras tendrán un peso de 1200 gramos por cada probeta a realizar (15 briquetas en total). Se procede a calentar el material en el horno por encima de la temperatura de mezcla (150°C a 165°C), además de esto se coloca a precalentar los moldes de compactación previamente engrasados (Ver figura 54).



Figura 54 Muestras para compactación

En la fracción de agregado previamente preparado se realiza un pequeño agujero en el centro de la muestra, donde se colocara el asfalto según el porcentaje de análisis; mezclar los materiales hasta conseguir una composición homogénea controlando la temperatura (140°C – 150°C) (Ver figura 55).



Figura 55 Mezcla de agregados y asfalto

Al obtener las condiciones idóneas de la muestra se la coloca en el horno por un periodo de aproximadamente 15 minutos, transcurrido este tiempo se coloca las muestras en los moldes de compactación, con una espátula caliente se dan 15 golpes en el perímetro del molde y 10 golpes en el centro, adicional a esto se debe colocar papel filtro en la parte inferior y superior una vez colocada la muestra. Compactar la muestra, en base al tráfico para la cual se está diseñando, misma que nos indica el número de golpes a compactar por ambas caras, utilizando el equipo mostrado en la figura 56.



Figura 56 Compactador

Transcurrido este proceso se retira la muestra compactada del collarín y se deja enfriar por un periodo de hasta 24 horas, clasificar las probetas por el porcentaje de asfalto colocado en cada diseño como se observa en la figura 57.



Figura 57 Muestras compactadas

3.7.3.3 Densidad específica bulk ASTM D2726

Este ensayo determina la densidad en mezclas asfálticas compactadas. Siendo esta la relación entre el peso en el aire de un volumen de material determinado y la masa de una volumen igual de agua a la misma temperatura habitualmente 25°C. Proceso por el cual se determina el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla compactada. Se utiliza especímenes compactados con granulometría densa.

Se extraen las probetas de los moldes, limpiarlas de manera que no produzca desprendimientos, determinar el peso en el aire del espécimen seco, tomar la temperatura del agua (si es de 25°C se espera 4 ± 1 minuto para tomar el peso, si varia en más de 2°C esperar entre 10 y 15 minutos y en el cálculo se debe realizar la corrección por temperatura) de manera simultánea se sumerge la briqueta en el agua y esperar a que se estabilice, y tomar su peso. Como se indica en la figura 58.



Figura 58 Muestra en tanque de inmersión

A continuación, se extrae el espécimen del agua y con una franela húmeda secar la superficie de la muestra, pesarla y obtener el peso en el aire del espécimen saturado con superficie seca (Ver figura 59).



Figura 59 Muestra extraída de tanque de inmersión

3.7.3.4 Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall ASTM D6927

La estabilidad Marshall es la carga máxima en libras requeridas para que se produzca la falla del espécimen después de aplicar una carga. En cambio el flujo es la deformación que experimenta la probeta desde el inicio de la aplicación de la carga hasta cuando esta falla. Este proceso se aplica a probetas cilíndricas compuestas por asfalto y una granulometría menor a 1”.

Se coloca las muestras en el tanque baño maría con agua a $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ por un tiempo de 30 a 40 min, las probetas deberán ser colocadas con una diferencia de 1 minuto en el agua. Precalear las mordazas a 21°C y engrasar las varillas guía (Ver figura 60).



Figura 60 Probetas en baño maría

Transcurrido el tiempo se retira del baño de agua, colocar la muestra centrada en la mordaza inferior y montar la mordaza superior, a continuación se coloca el conjunto de mordazas con la briqueta en la prensa, de manera simultánea se coloca el deformímetro en la varilla guía y encerar. Aplicar carga hasta que ocurra la falla en la briqueta y registrar las medidas. Como se observa en la figura 61.

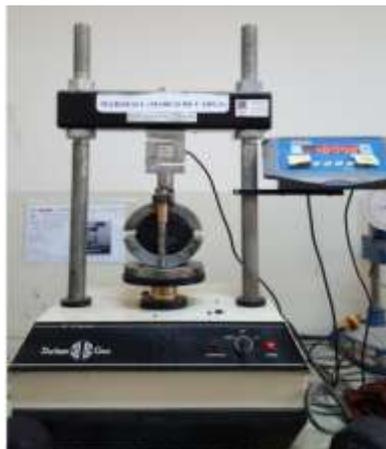


Figura 61 Ensayo Marshall

3.7.3.5 Gravedad específica máxima teórica ASTM D2041

Este ensayo determina la gravedad específica de mezclas asfálticas en caliente no compactada. Se debe tomar como elemental ya que permite calcular el porcentaje de vacíos de aire en la muestra. Para esto se procede a calentar la briqueta a una temperatura constante de $135\pm 5^{\circ}\text{C}$, se disgrega la muestra cuidando evitar que las partículas que conforma la muestra se fracturen, como se observa en la figura 62.



Figura 62 Material disgregado

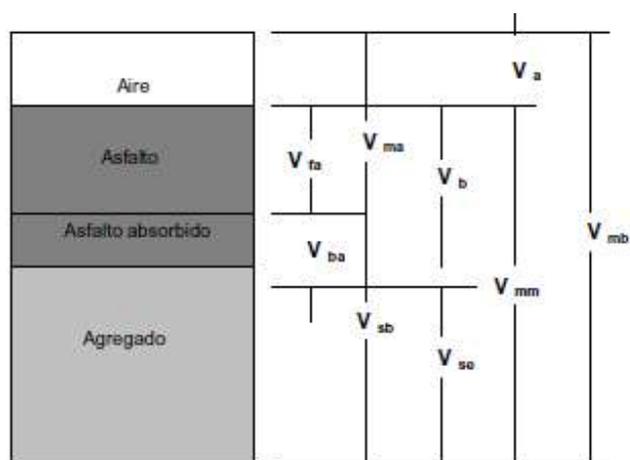
Calibrar el equipo y encerrar el recipiente, dejar enfriar la muestra a temperatura ambiente, de manera inmediata colocar agua hasta cubrir la muestra y con una bomba de vacío extraer las burbujas de aire durante un periodo de 15 ± 2 minutos como se muestra en la figura 63, transcurrido el tiempo estimado se libera el aire retenido y de forma contigua llenar el recipiente con agua enrasar y pesar.



Figura 63 Extracción de aire de muestra de asfalto

3.7.3.6 Análisis volumétrico de estabilidad INV E 799

Esta normativa estipula los porcentajes que debe tener una mezcla asfáltica como se lo observa en la figura 64, siendo estos los mencionados a continuación:



- V_{ma} = volumen de vacíos en agregado mineral
- V_{mb} = volumen total de la mezcla asfáltica.
- V_{mm} = volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos
- V_{fa} = volumen de vacíos llenados con asfalto
- V_a = volumen de vacíos de aire
- V_b = volumen de asfalto
- V_{ba} = volumen de asfalto absorbido
- V_{sb} = volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa)
- V_{so} = volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva)

Figura 64 Estabilidad volumétrica

Fuente: (Instituto Mexicano de Transporte, 2005)

- **El porcentaje de volumen de vacíos de aire (V_a):** Son las bolsas de aire que se encuentran entre las partículas de agregados cubiertos con asfalto
- **El porcentaje de volumen de vacíos en el agregado mineral (VAM):** Volumen intergranular de vacíos entre partículas del agregado de una mezcla compactada
- **Contenido de asfalto efectivo, expresado (P_{be}):** Contenido total de asfalto menos la fracción de ligante asfáltico absorbida por las partículas del agregado.
- **Gravedad específica efectiva de agregado (G_{se}):** Proporción de la masa de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto)

3.7.3.7 Resistencia a compresión diametral mezclas bituminosas NLT 346/91

En el ensayo se utiliza una probeta cilíndrica de la mezcla que se someterá a una carga cíclica de compresión según el plano diametral y vertical como se observa en la figura 65. El parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta, de manera conjunta se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal durante la realización del ensayo. (NLT 346/90)

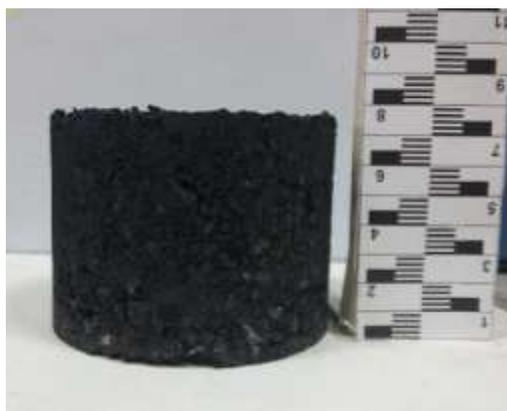


Figura 65 Probeta cilíndrica

EL equipo utilizado por la realización del ensayo constara de una máquina de compresión mecánica o hidráulica misma que transmita una carga a una velocidad uniforme de desplazamiento del sistema de carga de 0.85 ± 0.02 mm/s (50.8 mm/min) y una carga de 100 KN como mínimo en la que se colocaran dos barras metálicas a través de las cuales se transmitirá la carga a la probeta, de una longitud mayor o igual que la altura de la misma como se observa en la figura 66. Se realizaran un mínimo de tres muestras de acuerdo con el procedimiento utilizado en su fabricación. (NTL 346/90)



Figura 66 Prensa Hidráulica

Para la realización del ensayo se proceden a medir los testigos a ensayarse con un calibrador, determinando su diámetro en seis planos, dos a dos perpendiculares: dos en el plano superior de la probeta dos en el plano medio, y en el plano inferior. El diámetro medio "d" es la media aritmética de las 6 medidas. Las medidas entre las 2 medidas individuales no serán superior a 1 mm. La altura de la probeta se mide también con precisión de ± 0.1 mm en cuatro puntos definidos por los extremos de los planos

diametrales. La altura “h” será la media aritmética de los 4 valores medidos. La altura media no será superior al 5% de las media, con un máximo de 5 mm. Para continuar se colocan las muestras en la máquina de baño maría con agua a una temperatura de 25 ± 1 °C por un periodo de 6 horas, y se sacan de una a una antes de ensayarlas. (NTL 346/90)

Se registran los valores obtenidos del ensayo, que servirán para la obtención de la resistencia a compresión diametral indirecta con la siguiente formula:

$$R\tau = \frac{2*P}{\pi*h*d}$$

Ecuación 21

Donde:

$R\tau$ = Resistencia a compresión diametral (kg/cm²)

P = Carga máxima de rotura (kg)

h = Altura de la probeta mm (± 0.1 mm)

d = Diámetro de la probeta mm (± 0.1 mm)

3.8 Sistema de Adquisición de Datos

Para realizar una comparación de espectros térmicos mediante el SAD, se realizó una perforación en la zona de estudio de aproximadamente 60X60 cm con una profundidad de 15 cm, para la colocación del sistema se generó una probeta cilíndrica nueva cumpliendo los ensayos presentados en el inciso 3.8 y una probeta extraída de la zona de estudio. Se realizaron perforaciones de 5 cm, que sirvieron para la colocación de los sensores de temperatura como se indica en la figura 67.



Figura 67 Ubicación de sensores de temperatura

Para la ubicación de los sensores de temperatura se tomara una separación de $1/3$ de su altura para repartirlos de manera equilibrada y abarcar todo el núcleo de asfalto como se observa en la figura 67, la profundidad a la que se puede ubicar el sensor es de 7 cm, y de esta manera estimar la temperatura en su parte más profunda. El Sistema de Adquisición de Datos (SAD) se desarrolló tomando varias consideraciones, entre ellas el factor climático de la zona de estudio y de esta manera someter los especímenes a las mismas condiciones.

3.8.1 Caracterización del sistema

Requerimientos mínimos:

- Tiempo de vida útil requerida: 3 meses
- Variable principal a medir: Temperatura, número de variables 4
- Variable secundaria a medir: Humedad, numero de variables 1
- Frecuencia de muestreo: 1mpm
- Resolución de cifras significativas: 4

- Monitoreo tiempo real
- Almacenamiento de datos
- Visualización grafica del comportamiento de las variables

3.8.2 Diseño de SAD

A continuación se describe mediante un diagrama de bloques las etapas con las cuales consta el sistema. (Ver figura 68)

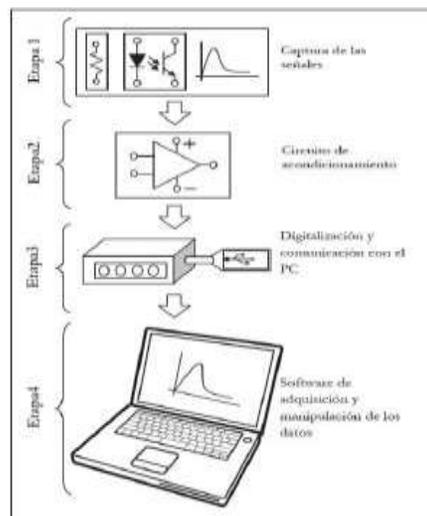


Figura 68 Etapas requeridas para el SAD a implementar

3.8.2.1 Etapa I: Captura de la señal física

En esta etapa se procede a interactuar con el medio físico con la utilización de transductores de prueba, que permitan conocer el comportamiento de las variables en campo. Para lo cual se han tomado datos de los siguientes parámetros, que han permitido delimitar el sistema como tal.

Condiciones ambientales en campo

- Clima: Subtropical
- Temperatura ambiente: 10 – 30 °C
- Probabilidad de precipitaciones: 42%
- Humedad: Hasta del 63%
- Viento 16Km/h

En base a estas condiciones y los requerimientos del sistema se procede a realizar la selección de materiales y componentes del sistema electrónico:

Componentes del Sistema electrónico:

- Microcontrolador Atmega 328P
- Microboard Arduino Nano V3
- Circuito PCB impreso
- Resistencias de calibración
- Puertos de entrada y salida (I/O)
- 25 m de cable UTP cat 6
- Sensores de temperatura ds18b20
- Sensor de humedad de suelo HL-69
- Conector RJ45 Hembra x2
- Conector RJ45 macho x2
- Conector Mini USB

Sensor de temperatura:



Figura 69 Sensor de temperatura

Sensor de Temperatura DS18B20 entre las principales características que respaldan su selección, se tiene:

- Aplicación de tipo Industrial
- Sumergible
- Tecnología 1-wire. (Se pueden conectar varios sensores usando una sola línea de datos).
- Posee un sistema integrado de instrumentación.
- ± 0.5 °C de exactitud en rangos de operación entre -10°C a 85°C
- No necesita calibración

Sensor de humedad



Figura 70 Sensor de humedad

La humedad registrada en campo obtuvo un valor máximo del 63% en condiciones de lluvia en etapas de prueba. Este valor se lo registró con el sensor YL-69, utilizando la técnica de medida de conductividad del suelo. A pesar de no ser un sensor tan robusto, durante las pruebas presentó un funcionamiento bastante óptimo con el circuito comparador YL-38 por lo cual se lo siguió utilizando en pruebas posteriores.

Principio de Funcionamiento:

Este sensor tiene la capacidad de medir la humedad del suelo. Aplicando una pequeña tensión entre los terminales del módulo YL-69 hace pasar una corriente que depende básicamente de la resistencia que se genera en el suelo y ésta depende mucho de la humedad. Por lo tanto al aumentar la humedad la corriente crece y al bajar la corriente disminuye.

Consiste en una sonda YL-69 con dos terminales separados adecuadamente y un módulo YL-38 que contiene un circuito comparador LM393 SMD (de soldado superficial) muy estable, un led de encendido y otro de activación de salida digital. Este último presenta 2 pines de conexión hacia el módulo YL-69, 2 pines para la alimentación y 2 pines de datos. VCC, GND, D0, A0.

3.8.2.2 Etapa II: Circuito de acondicionamiento

Para que los sensores funcionen adecuadamente es necesario realizar una etapa de instrumentación y acondicionamiento de la señal. La ventaja principal de estos sensores es que vienen incorporados etapas de acondicionamiento que permiten que la implementación del sistema sea confiable y sencilla.

Sensor DS18B20 “Temperatura”

Internamente el sensor de temperatura ds18b20 posee una etapa de instrumentación y memoria de control lógica que le permite operar adecuadamente y dar valores muy óptimos de temperatura que no necesitan calibración. Externamente necesita de una resistencia de 4.7 Kohms .Para la implementación de este proyecto se utilizó una de precisión, como lo indica el diagrama de la figura 71.

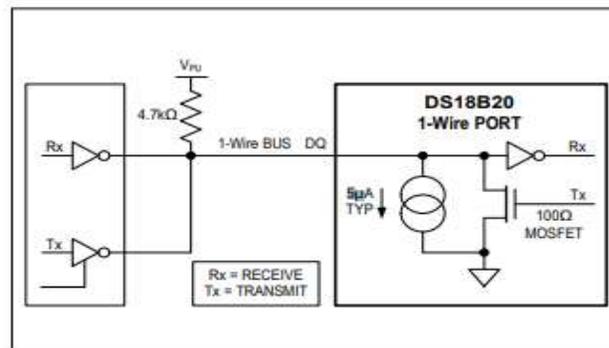


Figura 71 Hardware Configuration

Sensor YL-69 “Humedad”

El sensor YL-69 tiene un circuito LM393 que compara los voltajes que hay en sus dos entradas tomando su salida los dos valores de alimentación según alguna de ellas sea mayor que la otra. Esta etapa corresponde al acondicionamiento de la señal de lectura del sensor, detallado en la figura 72.

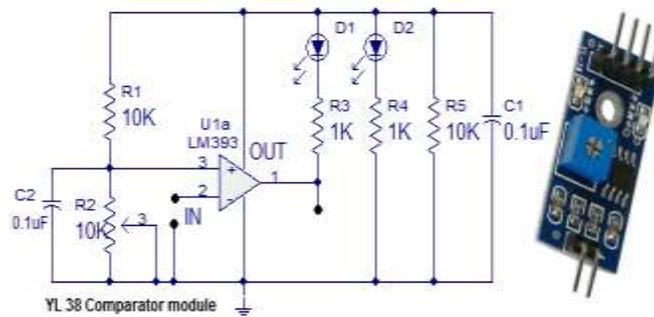


Figura 72 Acondicionamiento de señal

3.8.2.3 Etapa III: Digitalización y comunicación con PC

En esta etapa se procedió a programar el microcontrolador para que las entradas analógicas puedan ser leídas. La estructura y código del programa, se desarrolló en el IDE de arduino. Para visualizar el código de programación dirigirse al informe técnico presentado en el “**Anexo 1**”.

3.8.2.4 Etapa IV: Software de adquisición y manipulación de datos.

En esta etapa se ha hecho uso de librerías de PLX-DAQ, para establecer la comunicación serial entre el hardware de arduino y Microsoft Excel 2013. Mediante la cual se ha adecuado el script para que pueda registrar las variables requeridas por el sistema, como se observa en la figura 73.

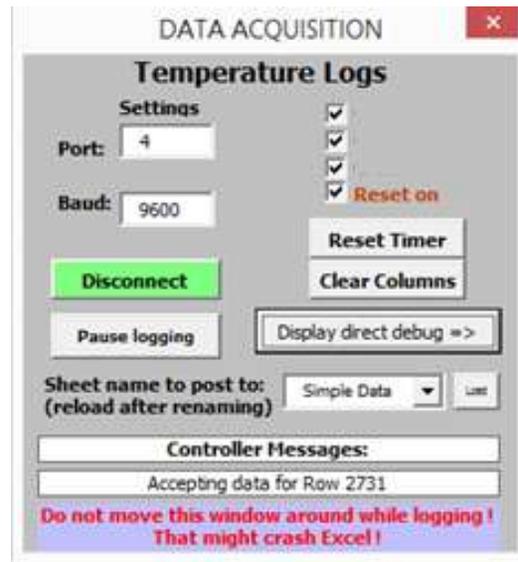


Figura 73 Sistema de adquisición

3.8.3 Mediciones

Una vez instalada la estación de monitorización, se procede a realizar las mediciones de temperatura. El dispositivo está programado para tomar datos de cada sensor después de 1 minutos por 24 horas, durante un periodo de 20 días, es decir que a lo largo del día se tendrá un total de 1440 datos de cada uno de los 4 sensores de temperatura y para el sensor de humedad, dando un total de 7200 datos al día que serán guardados para su posterior análisis.

CAPITULO IV

4 Resultados y discusión

4.1 Levantamiento ortodigital mediante tecnología UAV/UAS

El fin de una inspección de pavimentos es determinar el porcentaje de área de pavimento afectado, estableciendo los tipos de daño que se presentan, su extensión, severidad y recurrencia, factores que orientan al ingeniero en el momento de programar actividades de campo y de laboratorio para su estudio.

Para dicha captura de datos sobre fallas en el pavimento durante la inspección visual, se realizó el primer vuelo con el vehículo no tripulado (método UAV/UAS), dando como resultado un ortomosaico del área total de estudio (Ver figura 74).



Figura 74 Ortomosaico de zona de estudio

Una vez identificadas las patologías más severas existentes en la zona de estudio, se realizó una georreferenciación de estos puntos, mismos que se muestran en la figura 75, a su vez estos puntos se volverán sitios de control para la evaluación funcional del pavimento. Recordando que estos no exentan a que el resto del circuito vial presente algún otro tipo de problema.



Figura 75 Ubicación de patologías en la vía

Con el segundo vuelo se tomó las condiciones de falla más severas existentes en el circuito vial, de esta manera obtener orto imágenes con mejor resolución de las patologías del área de influencia, puntos que se detallan en la figura 76, considerando que a mayor número de puntos, mayor precisión al georreferenciar las zonas en la vía.

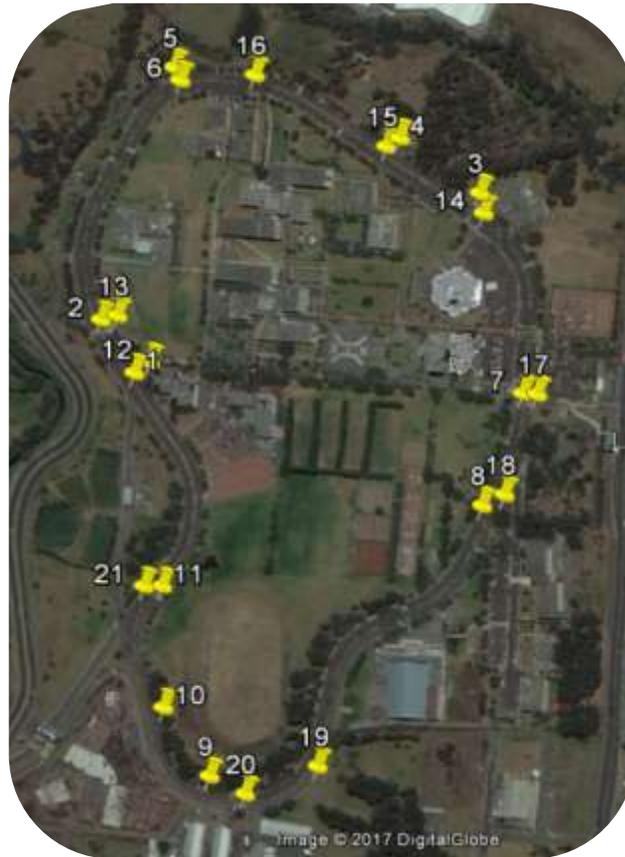


Figura 76 Puntos de control

4.1.1 Reconocimiento de patologías mediante UAV/UAS

Mediante el reconocimiento de las zonas con patologías en el asfalto, se desarrollaron mapas de ubicación como se observa en la figura 77, donde se presentan la zona afectada y la problemática existente, categorizadas según el “Manual para la Inspección Visual de Pavimentos Flexibles”.

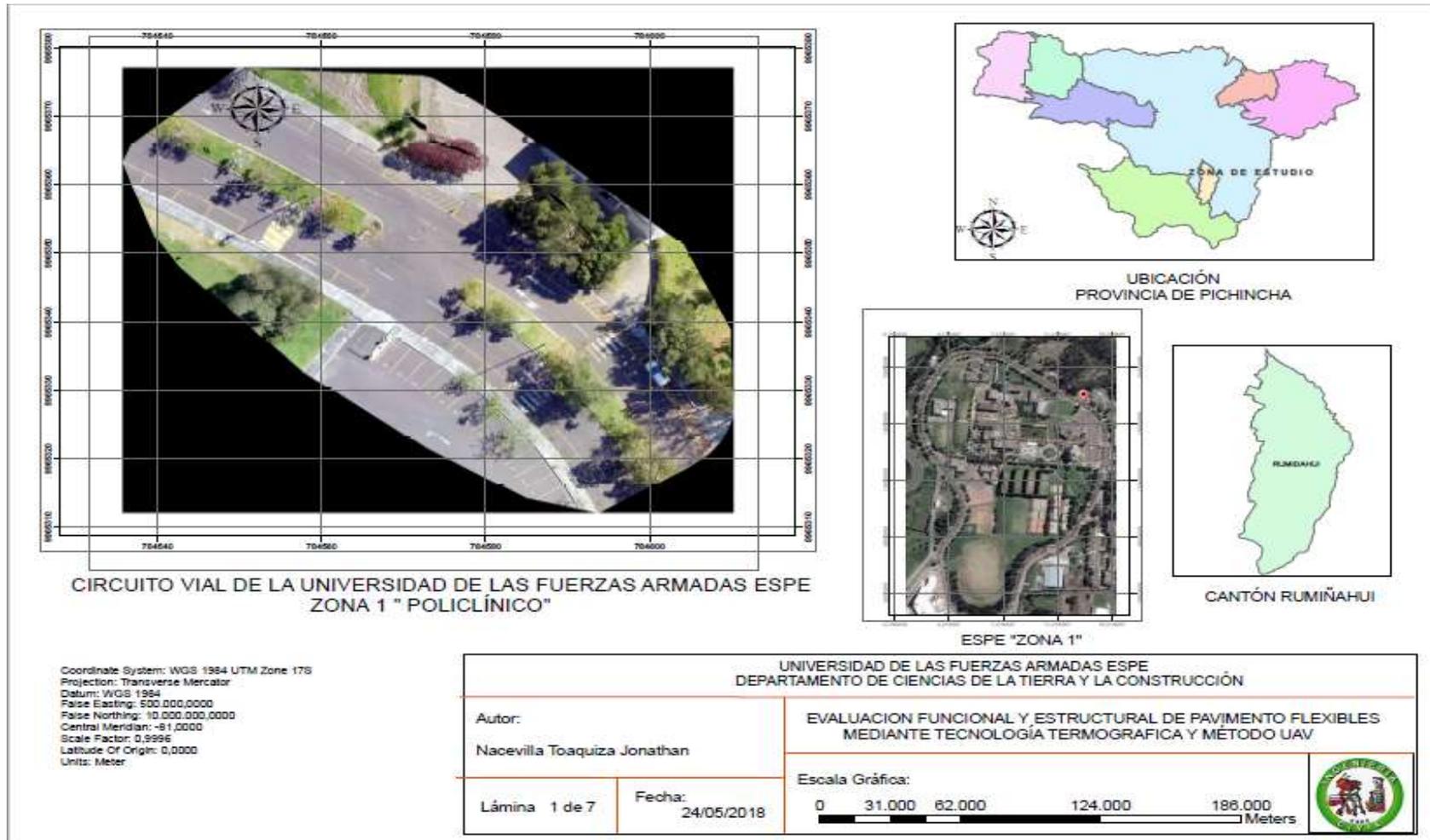


Figura 77 Mapa de ubicación “zona 1”

De manera similar se realizó un mapa de ubicación para las demás zonas de estudio descritas en el figura 75. Mismas que se encuentran detalladas en el “**Anexo 2**”.

4.2 Evaluación de patologías mediante tecnología termográfica

Para el estudio termográfico se realizó la captura de imágenes mediante la cámara térmica CAT FLIR S60 para cada uno de las patologías que se señalaron anteriormente, a su vez mediante este instrumento se podrá ver el comportamiento térmico inducido por el cambio climático de la zona de estudio en cada patología existente. La figura 78 presenta la emisividad producida por la falla estructural presente en la zona 1 de estudio.

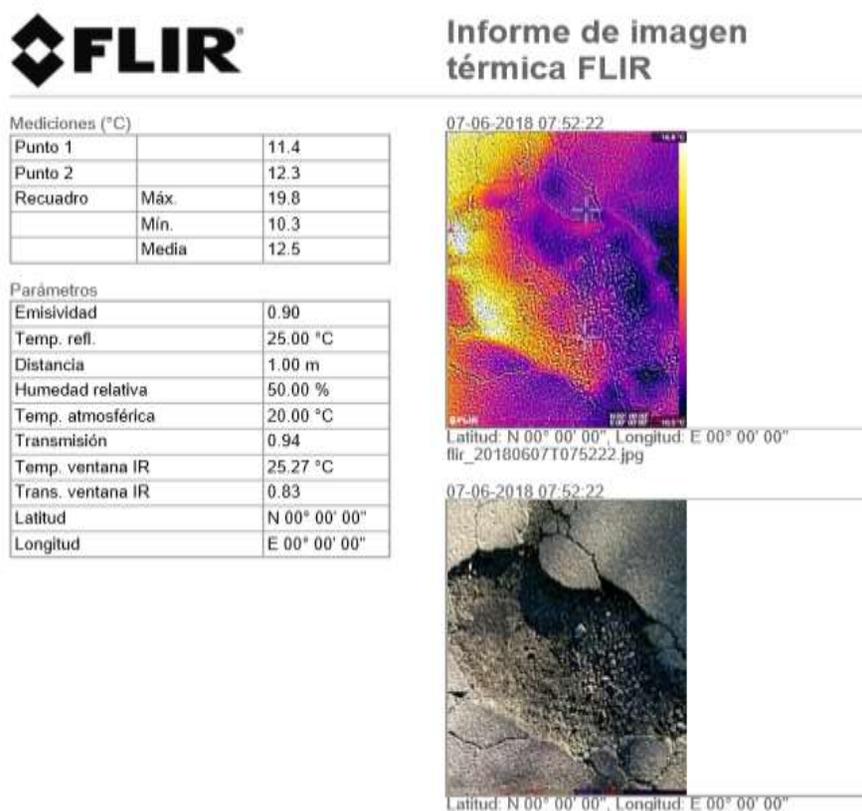


Figura 78 Imagen termográfica patología “Bache”

Para describir el resto de patologías al igual que la emisividad que produce cada una de estas, dirigirse al “**Anexo 3**”.

4.3 Condiciones climática “Energía en función de emisividad”

Para determinar la energía producida por el sol, se realizaron toma de datos mediante un piranómetro, el cual mide el índice de irradiancia en [watt/m²], que se exterioriza en el día por la presencia de luz solar. La toma de estos valores se los realizó en intervalos de 5 minutos, empezando desde las 9:00 AM hasta las 14:00 PM, considerando que este es el periodo con mayor presencia de irradiancia en la zona de estudio.

La toma de datos se lo realizo desde el 23 de noviembre de 2017 hasta el 16 de enero de 2018, tomando en cuenta que en este periodo de tiempo se presentaron cambios climáticos muy representativos para la parroquia de Sangolquí. La figura 79 personifica las curvas de masa del comportamiento de los cambios suscitados durante el día de estudio. A su vez la figura 80 bosqueja el comportamiento en los primeros 10 días de estudio, los cuales presentan una tendencia diferente, debida a que no se recibe la misma cantidad de luz solar.

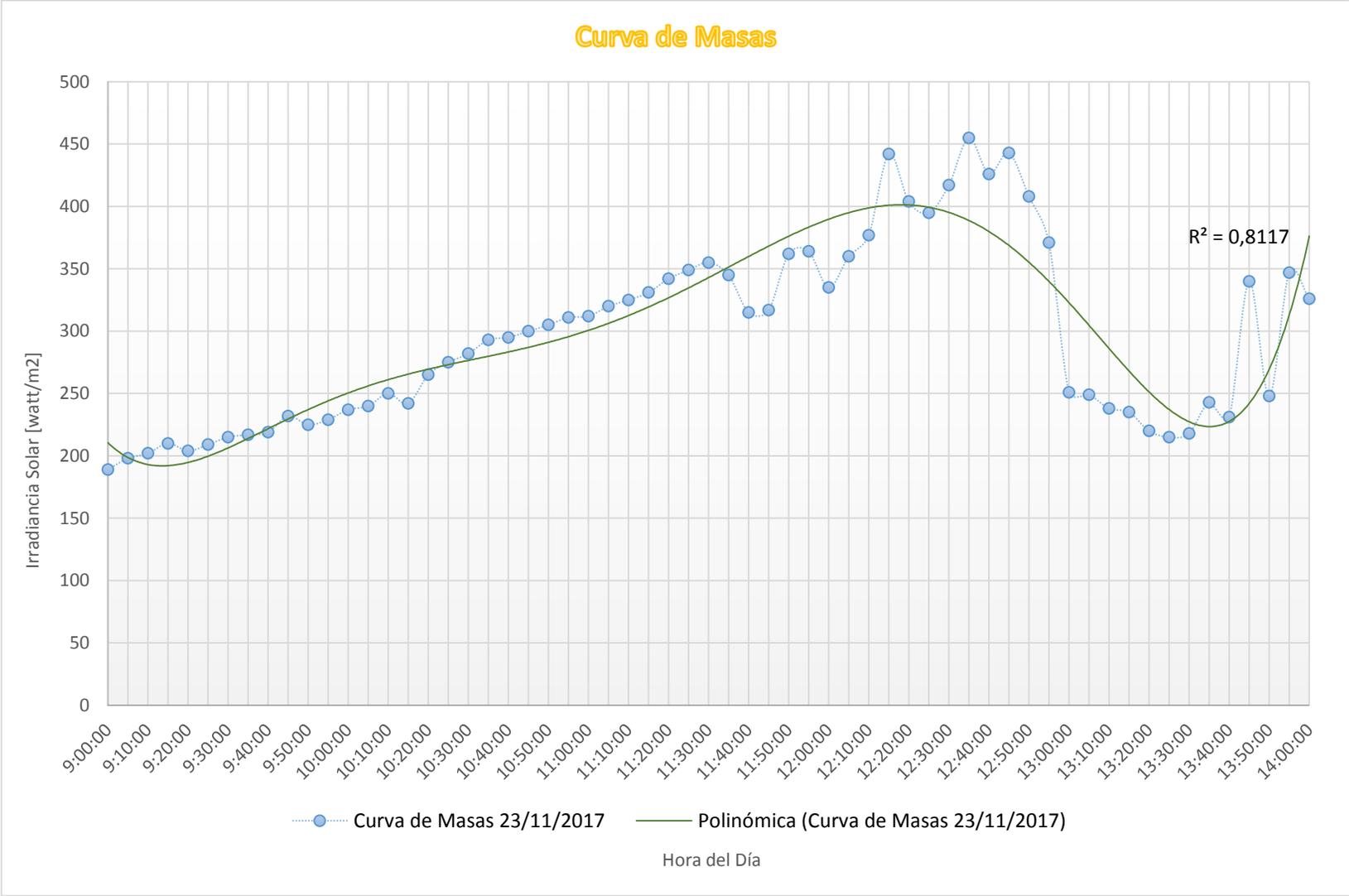


Figura 79 Curva de masas 23 de noviembre del 2017

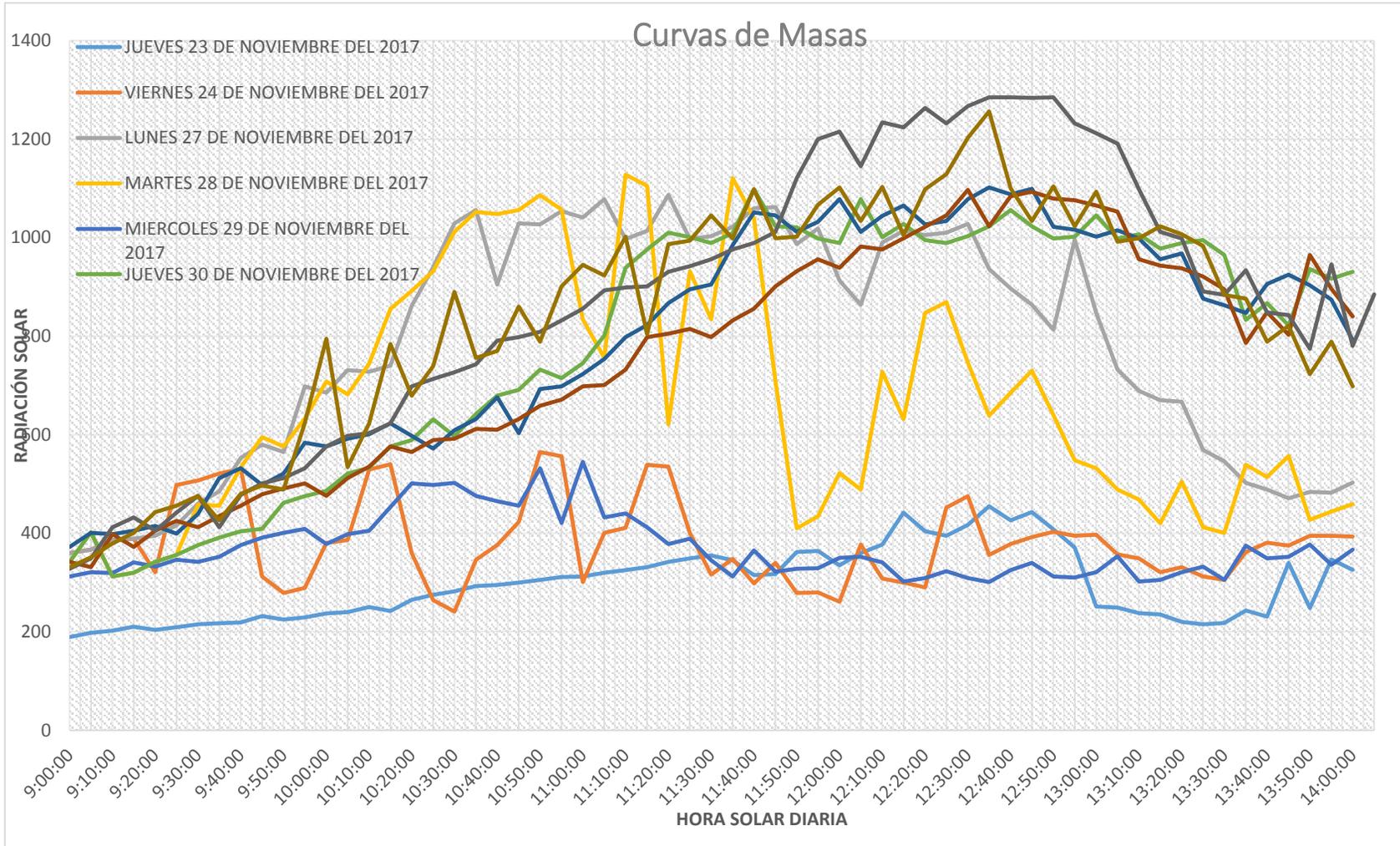


Figura 80 Curvas de masas 10 días de estudio

Para calcular la irradiancia diaria se realizó un promedio por hora de los datos obtenidos, la tabla 35 detalla el proceso utilizado para su obtención.

Tabla 35
Irradiancia promedio diario

23 de Noviembre del 2017									
Hora	[watt/m2]	Prom	Hora	[watt/m2]	Prom	Hora	[watt/m2]	Prom	
9:05 - 10:00	198	216,42	11:05 - 12:00	320	338,33	13:05 - 14:00	249	259,17	
	202			325			238		
	210			331			235		
	204			342			220		
	209			349			215		
	215			355			218		
	217			345			243		
	219			315			231		
	232			317			340		
	225			362			248		
	229			364			347		
237	335	326							
10:05 - 11:00	240	280,83	12:05 - 13:00	360	395,75	Promedio	9:05 - 10:00	216,42	
	250			377			10:05 -	280,83	
	242			442			11:00		
	265			404			11:05 -		
	275			395			12:00		338,33
	282			417			12:05 -		
	293			455			13:00		395,75
	295			426			13:05 -		
	300			443			14:00		259,17
	305			408			Total [watt/m2]		298,10
	311			371					
312	251								

En la figura 81 se observa el comportamiento que presenta la irradiancia mientras transcurren las horas, recordando que estas pueden aumentar o disminuir, dependiendo del nivel de luz solar que se presente en cada día de estudio. Para observar el

comportamiento del resto de días de estudio dirigirse al “**Anexo 4**”, que presentara a su vez las respectivas tablas resume del cálculo en mención.

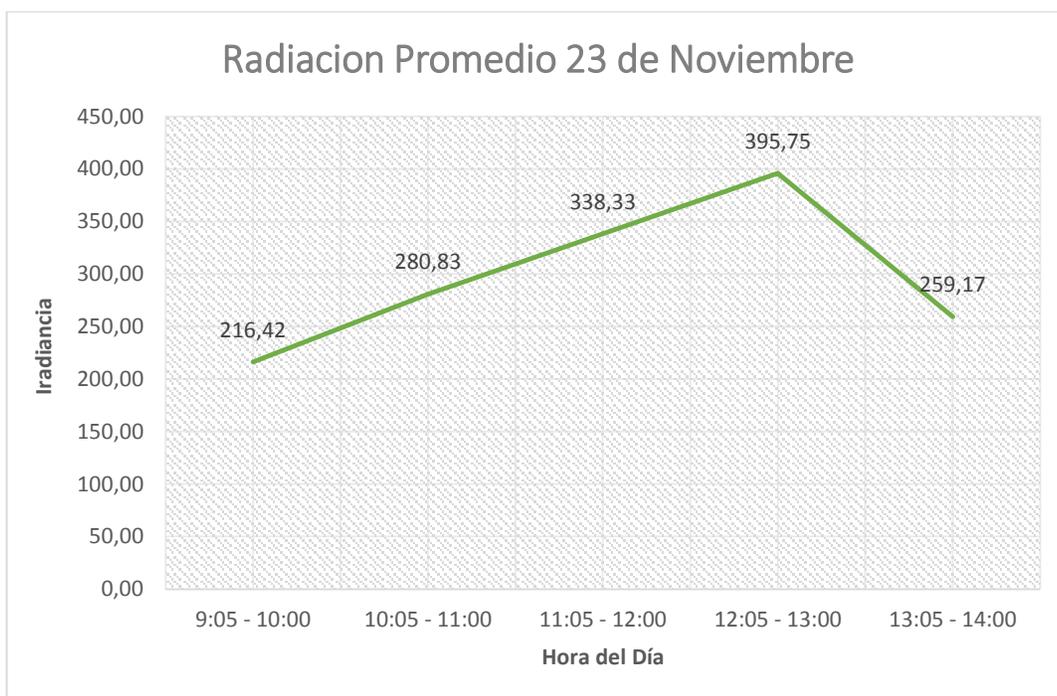


Figura 81 Irradiancia promedio

4.3.1 Método de Angstrom

Para la utilización del método en mención se desarrollaron curvas promedio, considerando para esta ocasión los días del mes de noviembre, con el fin de establecer el rango de Horas de Sol Promedio, refiriéndose de esta manera al periodo de mayor intensidad solar. La tabla 36 descrita a continuación representa las irradiancias promedio establecidas en este mes. A su vez la figura 82 muestra el intervalo con mayor irradiancia solar.

Tabla 36*Irradiancia promedio mes de noviembre*

23 de Noviembre		
Promedio	9:05 - 10:00	216.42
	10:05 - 11:00	280.83
	11:05 - 12:00	338.33
	12:05 - 13:00	395.75
	13:05 - 14:00	259.17

28 de Noviembre		
Promedio	9:05 - 10:00	474.33
	10:05 - 11:00	937.50
	11:05 - 12:00	800.92
	12:05 - 13:00	673.75
	13:05 - 14:00	469.58

24 de Noviembre		
Promedio	9:05 - 10:00	398.33
	10:05 - 11:00	407.25
	11:05 - 12:00	367.33
	12:05 - 13:00	376.92
	13:05 - 14:00	356.33

29 de Noviembre		
Promedio	9:05 - 10:00	359.00
	10:05 - 11:00	471.00
	11:05 - 12:00	366.83
	12:05 - 13:00	320.42
	13:05 - 14:00	339.50

27 de Noviembre		
Promedio	9:05 - 10:00	498.25
	10:05 - 11:00	928.42
	11:05 - 12:00	1019.92
	12:05 - 13:00	938.67
	13:05 - 14:00	567.00

30 de Noviembre		
Promedio	9:05 - 10:00	394.58
	10:05 - 11:00	637.58
	11:05 - 12:00	987.83
	12:05 - 13:00	1020.08
	13:05 - 14:00	936.50

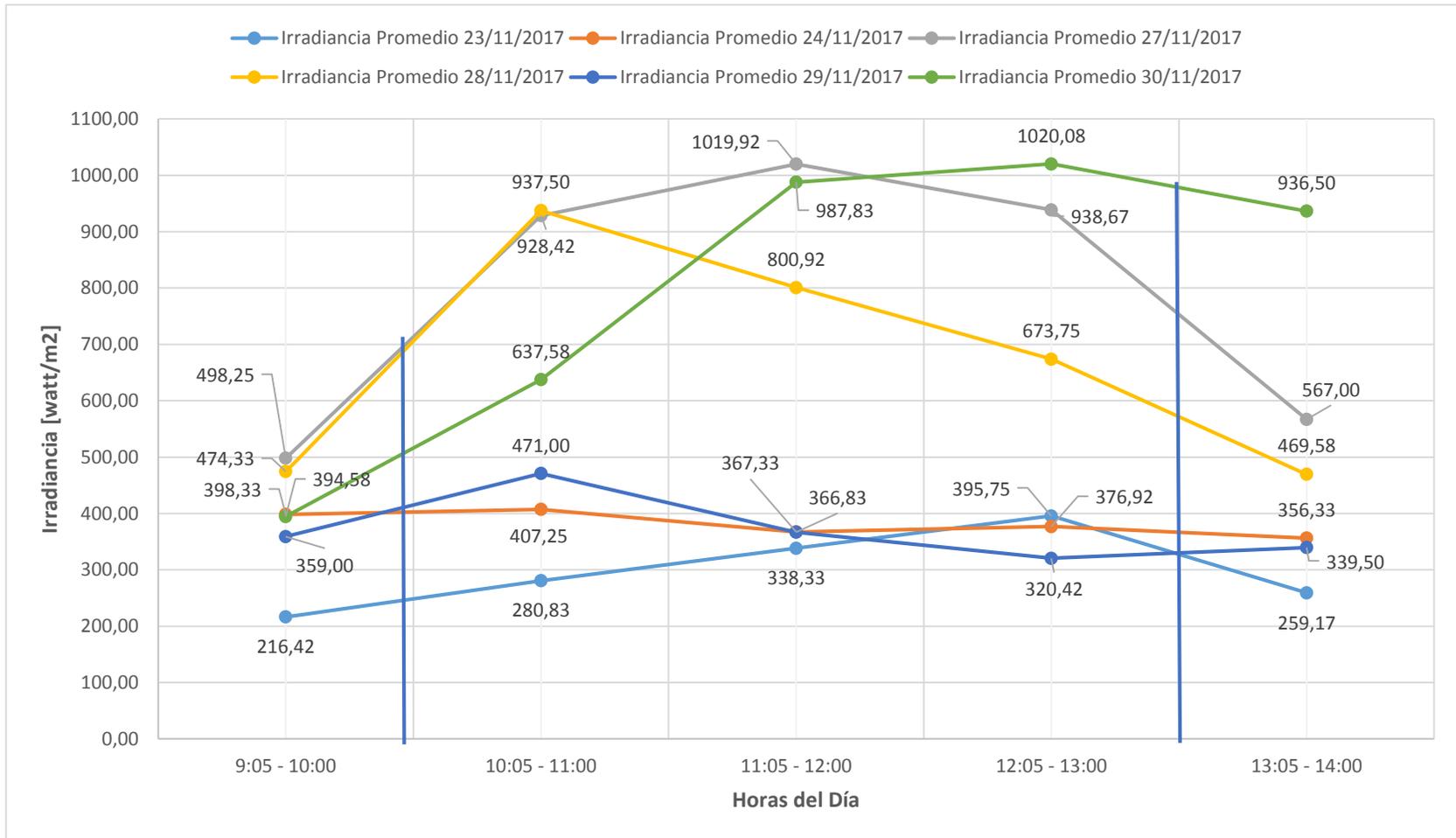


Figura 82 Horas de Sol Promedio

Obtenido las irradiancias promedio, además de las HSP se calcula la energía producida por el sol en la parroquia de Sangolquí, detallando en la tabla 37 y 38.

Tabla 37
HSP en días de estudio

Días de Toma de Datos	Horas de Sol Promedio	Promedio
Del 23 de Noviembre al 30 de Noviembre	3	3
Del 01 Diciembre al 12 de Diciembre	3	
Del 13 de Diciembre al 20 de Diciembre	3	
Del 21 de Diciembre de 11 de Enero	3	

Tabla 38
Energía Solar

23 de Noviembre del 2017					Temperatura día/hora	
	Hora	[watt/m2]	HSP	Energía [watt-h/m2]	Min.	Max.
Promedio	9:05 - 10:00	216.42	3.00	649.25	13.53	17.25
	10:05 - 11:00	280.83	3.00	842.50	15.00	17.44
	11:05 - 12:00	338.33	3.00	1015.00	15.99	21.60
	12:05 - 13:00	395.75	3.00	1187.25	17.08	22.08
	13:05 - 14:00	259.17	3.00	777.50	18.45	23.55
Promedio				894.30	16.01	20.38

Al haber establecido estos parámetros de cálculo utilizaremos las ecuaciones del método de Angstrom y se procede a calcular la radiación, detallando su procedimiento a continuación, mismo que se realizará para cada uno de los días en estudio.

$$H_o = H_e \left(a + b * \frac{n}{N} \right)$$

$$H_o = 894.30 \left(0.28 + 0.45 * \frac{3.0}{5} \right)$$

$$H_o = 491.865 \text{ W.h/m}^2$$

La tabla 39 presenta los valores de radiación solar obtenidos en los primeros 12 días de estudio, siguiendo el método mencionado.

Tabla 39
Radiación Solar Ho

Días de Estudio	Energía [watt-h/m²]	Radiación (Ho) [watt-h/m²]
23 de Noviembre del 2017	894.30	491.865
24 de Noviembre del 2017	1143.70	629.035
27 de Noviembre del 2017	2371.35	1304.243
28 de Noviembre del 2017	2013.65	1107.508
29 de Noviembre del 2017	1114.05	612.728
30 de Noviembre del 2017	2385.95	1312.273
1 de Diciembre del 2017	2402.85	1321.568
4 de Diciembre del 2017	2294.15	1261.783
5 de Diciembre del 2017	2625.00	1443.750
7 de Diciembre del 2017	2543.70	1399.035
11 de Diciembre del 2017	2918.75	1605.313
12 de Diciembre del 2017	3157.80	1736.790

Para establecer puntos de comparación y representar las variaciones climáticas que se presentan la parroquia de Sangolquí, se hace comparativa al estudio “MODELADO MATEMÁTICO Y ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES ÓPTICAS DE UN ABSORBEDOR DE RADIACIÓN SOLAR DE TUBOS CONCÉNTRICOS” por Ricardo Mayorga, que analiza la irradiancia solar en el año 2016 obteniendo los siguientes datos (Tabla 40).

Tabla 40
Radiación solar año 2016

Días de Estudio	Radiación (Ho) [watt-h/m ²]
23 de Noviembre del 2016	4352.395
24 de Noviembre del 2016	4348.994
27 de Noviembre del 2016	4339.332
28 de Noviembre del 2016	4336.312
29 de Noviembre del 2016	4333.400
30 de Noviembre del 2016	4330.602
1 de Diciembre del 2016	4327.922
4 de Diciembre del 2016	4320.641
5 de Diciembre del 2016	4318.479
7 de Diciembre del 2016	4314.579
11 de Diciembre del 2016	4308.561
12 de Diciembre del 2016	4307.444

Valores susceptibles a corrección referente a periodos de estudio para establecer las mismas condiciones de análisis como se detallan en la tabla 41.

Tabla 41
Radiación solar corregida

Días de Estudio	Radiación (Ho) [watt-h/m ²]	Ajuste de Datos (Ho) [watt-h/m ²]
23 de Noviembre del 2016	4352.395	1813.498
24 de Noviembre del 2016	4348.994	1812.081
27 de Noviembre del 2016	4339.332	1808.055
28 de Noviembre del 2016	4336.312	1806.797
29 de Noviembre del 2016	4333.400	1805.583
30 de Noviembre del 2016	4330.602	1804.418
1 de Diciembre del 2016	4327.922	1803.301
4 de Diciembre del 2016	4320.641	1800.267
5 de Diciembre del 2016	4318.479	1799.366
7 de Diciembre del 2016	4314.579	1797.741

11 de Diciembre del 2016	4308.561	1795.234
12 de Diciembre del 2016	4307.444	1794.768

Finalmente se presenta en la tabla 42 una comparativa de cómo se han suscitado los cambios de radiación en la zona de estudio, además de un equivalente de radiación obtenida en función de la temperatura.

Tabla 42
Radiación solar en función de temperatura

Días de Estudio	Radiación (Ho) año 2016 [watt-h/m2]	Radiación (Ho) año 2017 [watt-h/m2]	Temperatura Promedio Diaria 9:00 14:00	
			Min	Max
23 de Noviembre	1813.498	491.865	16.01	20.38
24 de Noviembre	1812.081	629.035	16.87	20.88
27 de Noviembre	1808.055	1304.243	19.238	24.57
28 de Noviembre	1806.797	1107.508	19.95	25.09
29 de Noviembre	1805.583	612.728	17.37	21.70
30 de Noviembre	1804.418	1312.273	18.3	24.79
1 de Diciembre	1803.301	1321.568	17.89	22.70
4 de Diciembre	1800.267	1261.783	19.76	25.20
5 de Diciembre	1799.366	1443.750	19.87	25.73
7 de Diciembre	1797.741	1399.035	19.58	25.78
11 de Diciembre	1795.234	1706.405	17.87	22.53
12 de Diciembre	1794.768	1706.405	17.212	21.83

4.4 Análisis de tráfico “TPDA”

Para el análisis de tráfico, se realizó un conteo por tipología vehicular y número de ejes equivalentes, se clasificó al parque automotor que circula por el anillo vial de la Universidad de las Fuerzas armadas ESPE.

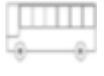
Tabla 43
Conteo volumétrico de tráfico

# HORA	INTERVALO	TIPO DE VEHÍCULO					VOLUMEN HORARIO POR TIPO DE VEHÍCULO					TOTAL
		LIVIANOS 	BUSES 	CAMIÓN		MOTOS 	LIVIANOS	BUSES	CAMIÓN		MOTOS	
				2 EJES 	3 EJES O MAS 				2 EJES	3 EJES O MAS		
1	7:00 - 7:05	20	5	0	0	4	283	11	1	0	37	29
	7:05 - 7:10	22	3	0	0	4						29
	7:10 - 7:15	23	1	0	0	1						25
	7:15 - 7:20	27	0	0	0	4						31
	7:20 - 7:25	23	0	0	0	2						25
	7:25 - 7:30	22	0	0	0	5						27
	7:30 - 7:35	21	0	0	0	4						25
	7:35 - 7:40	23	0	0	0	3						26
	7:40 - 7:45	25	1	0	0	5						31
	7:45 - 7:50	19	0	0	0	1						20
	7:50 - 7:55	28	1	0	0	1						30
	7:55 - 8:00	30	0	1	0	3						34
2	13:00 - 13:05	26	5	1	0	4	288	17	2	0	32	36
	13:05 - 13:10	27	4	0	0	2						33
	13:10 - 13:15	26	3	0	0	1						30
	13:15 - 13:20	24	1	0	0	1						26
	13:20 - 13:25	30	0	0	0	3						33
	13:25 - 13:30	21	1	0	0	1						23
	13:30 - 13:35	22	0	0	0	3						25
	13:35 - 13:40	20	0	0	0	4						24
	13:40 - 13:45	21	0	0	0	2						23
	13:45 - 13:50	24	1	0	0	5						30
	13:50 - 13:55	25	0	0	0	4						29
	13:55 - 14:00	22	2	1	0	2						27
TOTAL DEL DIA						571	28	3	0	69	671	

Este proceso se lo realizo por un periodo de 10 días laborales, para realizar una estimación del parque automotor que circula diariamente por el circuito vial, para verificar los demás días en estudio dirigirse al “**Anexo 5**”.

Para detallar los resultados obtenidos la tabla 44 presenta la clasificación vehicular y el conteo obtenido en todos los días de estudio.

Tabla 44
TPDA días de estudio

Clase	Tipo	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Total	Porcentaje de R.
		06-nov-17	07-nov-17	08-nov-17	09-nov-17	10-nov-17	13-nov-17	14-nov-17	15-nov-17	16-nov-17	17-nov-17		
Livianos		571	599	596	561	541	568	557	564	589	556	5702	88.01%
Buses		28	25	24	24	24	24	24	24	24	24	245	3.78%
Camión		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	30	0.46%
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00%
Motos		47	50	54	58	54	42	52	51	49	45	502	7.75%
Total		649	677	677	646	622	637	636	642	665	628	6479	100.00%

4.4.1 Proyección de tráfico futuro

Para estimar el crecimiento vehicular se utilizó los métodos aritmético y geométrico, de igual forma basándose en la normativa vigente MTOP, quienes realizaron estudios desde 1963 para estimar la tasa de crecimiento (i), han determinado que para todo el Ecuador la tasa varía entre el 5% y 7%, y se considera una proyección de tránsito de 15 a 20 años. De donde se tomara como base de cálculo la mayor tasa de crecimiento y la menor proyección de vida útil del pavimento, y de esta manera estimar la situación más crítica que se puede suscitar en la zona de estudio.

Método aritmético

$$TPDA_f = TPDA_o * \left(1 + \frac{i}{100}\right)^t$$

$$TPDA_f = 6677 * \left(1 + \frac{7}{100}\right)^{15}$$

$$TPDA_f = 18422.05 \approx 18422 \text{ vehiculos/año}$$

$$TPDAf = 18422 \frac{veh}{año} * \frac{1 año}{365 días}$$

$$TPDAf = 50.47 \frac{veh}{día} \approx \frac{51veh}{día}$$

Método geométrico

$$TDPAf = TPDAo * e^{\left(\frac{i*t}{100}\right)}$$

$$TDPAf = 6677 * e^{\left(\frac{7*15}{100}\right)}$$

$$TPDAf = 19080.54 \approx 19081 \text{ vehiculos/año}$$

$$TPDAf = 19081 \frac{veh}{año} * \frac{1 año}{365 días}$$

$$TPDAf = 52.27 \frac{veh}{día} \approx \frac{52veh}{día}$$

4.4.2 Volumen horario de máxima demanda (VHMD)

El valor máximo de volumen de hora pico obtenido en una hora de estudio es de: 2844 veh/hora, de la sumatoria presentada en la tabla 45

Tabla 45

Volúmenes de hora pico

Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10	Total
06- nov- 17	07- nov- 17	08- nov- 17	09- nov- 17	10- nov- 17	13- nov- 17	14- nov- 17	15- nov- 17	16- nov- 17	17- nov- 17	
283	291	301	278	268	276	289	281	301	276	2844

4.4.3 Factor de hora de máxima demanda o factor hora pico (FHMD)

Se determina este factor para expresar la relación del volumen vehicular de la hora máxima demandada, a la tasa de volumen máximo. Para lo cual se utilizó la siguiente ecuación:

$$FHMD = \frac{VHMD}{N * q_{max}}$$

Ecuación 22

Donde:

N: número de periodos durante la hora de máxima demanda (HMD)

q_{max}: flujo máximo (número de vehículos)

Al realizar la toma de datos en periodos de 5 minutos, el valor de N=12, donde:

$$FHMD = \frac{283}{12 * 571}$$

$$FHMD = 0.041 \text{ veh/hora}$$

4.4.4 Esal de diseño

Determinado el incremento futuro del parqueadero vehicular que circulará por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se calcular el ESAL de diseño mismo que proporciona el número de ejes equivalentes parámetro usado en el diseño de la estructura del pavimento, obteniendo los siguientes resultados: (Tabla 46)

Tabla 46
ESAL de diseño

Tipo de Vehículo	N° veh/día	N° veh/día (1 sent)	N° veh/año	F.E.C(factor camión)	ESAL en el carril de diseño	Factor de crecimiento	ESAL de diseño	ESAL de diseño
	1	2=50%(1)	3=1X365	4	5=3x4	6	7=5x6	7.1=5x6xFC
2D	5702	2851	1040615	1.06	1103051.9	25.13	27718615.47	22174892.38
2DA	245	122.5	44712.5	1.79	80035.375	21.58	1727048.43	1381638.743
Motos	502	251	91615	0.265	24277.975	21.58	523883.83	419107.0619
2DB	30	15	5475	1.79	9800.25	18.60	182274.01	145819.2047
Total	6479	3239.5	1182417.5		1217165.5	92.885063	30151821.74	113280.74

R(2D)=	0.07
N=	15
FC	0.8
R(2DA)=	0.05
Motos =	0.03

El ESAL en el carril de diseño para el periodo de diseño de 15 años es de 113280.74 ejes equivalentes de 8.2 Ton.

4.5 Evaluación funcional de pavimento flexible

La evaluación se la realizo mediante una inspección visual en el pavimento del circuito cerrado, con la finalidad de establecer el índice de serviciabilidad, relación que mide el nivel de servicio, seguridad y confort hacia los usuarios.

4.5.1 Caracterización de patologías en zona de estudio

Mediante los mapas de ubicación realizados mediante el levantamiento orto fotográfico, se procedió a reconocer y medir las diferentes patologías existentes en el circuito vial, y de esta manera determinar el Δ PSI, mismo que calificara el estado de la estructura vial existente. Las figuras presentadas a continuación detallan cada una de estas patologías existentes, en cada uno de los puntos mencionados anteriormente.



Figura 83. Zona 1 "Bache"



Figura 84. Zona 2 "Falla longitudinal"



Figura 85 Zona 3 "Falla Transversal"



Figura 86 Zona 4 "Falla en bloque"



Figura 87 Zona 5 "Hundimiento"



Figura 88 Zona 6 "Piel de cocodrilo"

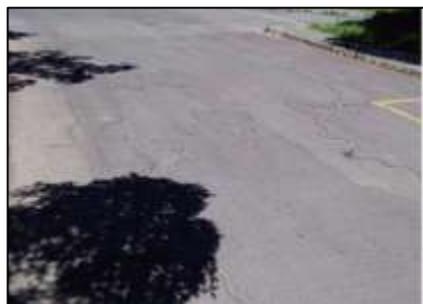


Figura 89 Zona 7
"Descascaramiento"



Figura 90 Zona combinada de fallas
"Mixta"

Una vez identificadas las diferentes patologías existentes en la carpeta de rodadura del pavimento se procedió a medir cada uno de estas. La tabla 47 presentada a continuación detalla las áreas afectadas por cada una de estas.

Tabla 47
Áreas afectadas de carpeta de rodadura

Daño	Frecuencia	Área Afectada (m²)
Bache	4	80.16
Falla Longitudinal	84	380.77
Falla Transversal	27	126.14
Falla de Bloque	71	6489.82
Hundimiento	2	2.4
Piel de cocodrilo	13	1078.13
Descascaramiento	7	190.07
Mixta	16	2820.63
	224	11168.12

4.5.2 Índice de serviciabilidad

Para calcular el índice de serviciabilidad se rigió en lo estipulado en el apartado 2.4.3 y mediante los valores descritos en la tabla 43.

$$Pt = 5.03 - 1.91 \log(1 + SV) - 1.38(RD^2) - 0.01(C + P)^{0.5}$$

$$Sv = 2$$

Para el cálculo del constante C se sumaron las áreas de las fallas longitudinales y transversales dando un resultado de 5456.33 pies² en todo el pavimento entonces C resulta de dividir de 5456.33 pies² cada 1000 de pies², por lo tanto C= 5.46

Para el cálculo de P se realizó el mismo procedimiento para baches. P=0.91

Y para la constante RD según las mediciones de campo se usó una media de 0,85 pulgadas.

$$Pt = 5.03 - 1.91 \log(1 + 2) - 1.38(0.85^2) - 0.01(5.46 + 0.91)^{0.5}$$

$$P_t = 3.09$$

Se usó un P_o para pavimentos nuevos de 4.2

$$PSI = P_o - P_t$$

$$PSI = 4.2 - 3.09$$

$$PSI = 1.11$$

De acuerdo a la tabla 16-2 de la escala de clasificación presentada por la normativa AASHTO, los pavimentos en la categoría 2.0-1.0, se han deteriorado hasta un punto donde pueden afectar la velocidad de tránsito de flujo libre, a su vez pueden presentar grandes baches y grietas profundas; el deterioro incluye pérdida de áridos, agrietamiento y esto se presenta en un 50% o más de la superficie, escenario existentes en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, reflejándose esto al obtener un $PSI=1.11$

4.6 Evaluación estructural de pavimento flexible

Una vez identificadas las patologías del circuito vial y como estas han afectado al pavimento en sus niveles de serviciabilidad, se efectúa un estudio de su estructura mediante la realización de calicatas. La tabla 48 detalla las coordenadas de uno de los puntos de estudio, a su vez mediante identificación fotográfica se puede observar su proceso de ejecución.

Tabla 48
Coordenadas de calicata zona 3

Coordenadas	
Geográficas	0° 18' 54.58" S
	78° 26' 47.19" W
UTM WGS84	784238.81 m E
	9965130.64 m N

El proceso detallado anteriormente se realizó para cada uno de los puntos en estudio, en este caso se tuvo 5 sitios de análisis. Para observar los demás puntos de estudio dirigirse al “**Anexo 6**”.



Figura 91 Perforación de zona de estudio



Figura 92 Identificación de subrasante



Figura 93 Medida de las capas granulares



Figura 94 Muestra para caracterización

Al realizar una caracterización en campo de las distintas capas de la estructura del pavimento existente se visualizó distintos espesores en cada una de las zonas de estudio, siendo estas zonas las presentadas en los mapas de ubicación, teniendo como resultado los planteados a continuación (Tabla 49).

Tabla 49
Espesores de estructura del pavimento

Zona de estudio	Carpeta de rodadura	Material granular
Zona 1 "Policlínico"	3 cm	50 cm
Zona 2 "Frente Lab. De electrónica"	4 cm	40 cm
Zona 3 "Frente Lab. geográfica"	4 cm	40 cm
Zona 4 "Frente estadio cercado"	3 cm	38 cm
Zona 5 "Frente a salida posterior"	4 cm	30 cm

4.6.1 Caracterización de material granular

Para caracterizar el material existente en la estructura vial se realizó una granulometría siguiendo la normativa ASTM C136. Al realizar la caracterización se obtuvo la siguiente faja granulométrica, presentada en la figura 96

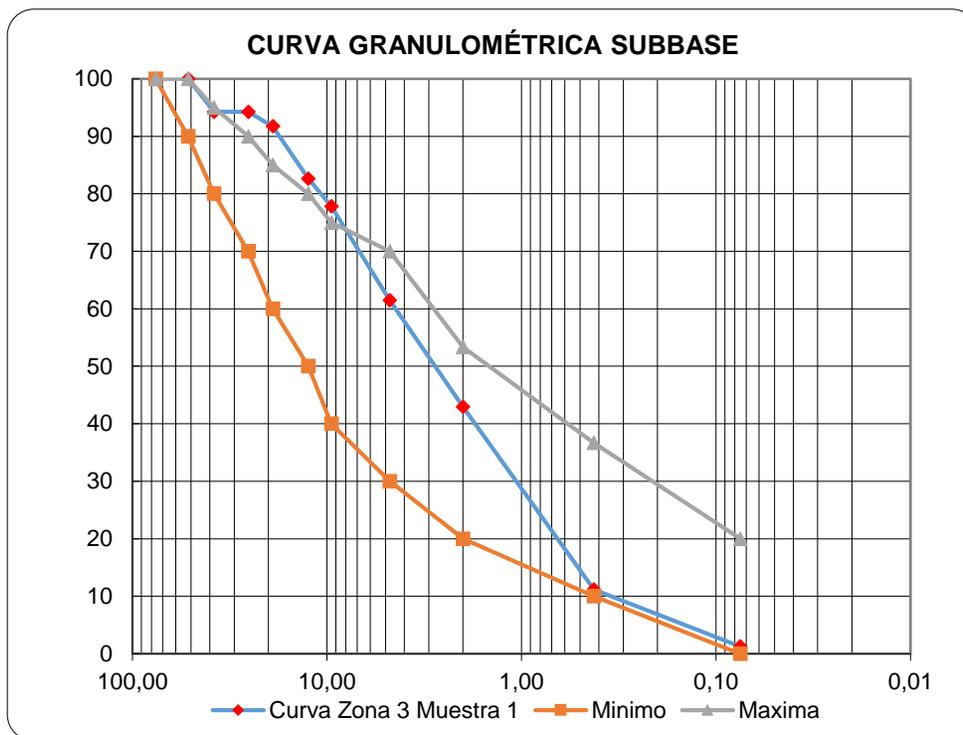


Figura 95 Curva estabilizada

Tomando en consideración la normativa MTOP-F001 2002, vigente en el Ecuador y basándose en la tabla 403-1.1, misma que describe las fajas granulométricas de clasificación, la granulometría presentado en la figura 96, **no cumple con las características estipuladas al encontrarse fuera de sus límites tanto superior como inferior, por tal motivo el material granular ensayo no cumple con las condiciones de subbase.**

Para el análisis del resto de muestras dirigirse al “**Anexo 7**”.

4.6.2 Ensayo CBR (California Bearing Ratio)

Para el correcto análisis del CBR, se procedió a realizar un ensayo de compactación para obtener la humedad óptima de la subrasante, mediante este proceso se obtuvieron

los resultados presentados en la tabla 50, valor inicial para comprobar la resistencia a corte de la muestra de suelo existente en la zona de estudio.

Tabla 50
Resultados de compactación

Contenido de humedad (%)	Densidad Seca Máxima (g/cm ³)
10.9	1.578
12.2	1.608
16.7	1.786
20.4	1.697

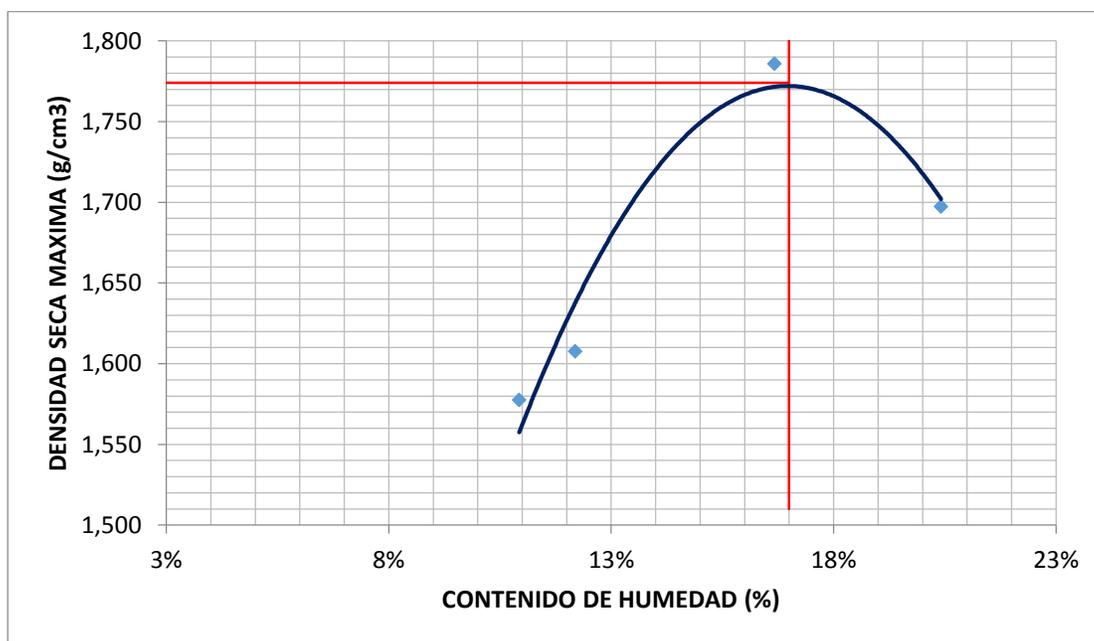


Figura 96 *Curva de humedad óptima*

Obteniendo de esta manera una humedad óptima del 17% con una densidad seca máxima de 1.774 resultados utilizados para la preparación de la muestra y realización del ensayo CBR. Mismo que se detallan en la tabla 51.

Tabla 51
Resultados CBR

# Golpes	Densidad Seca	CBR 1"	CBR 2"	DS Proctor	90% DS
12	1564	27.317	28.352	1774	1596.6
25	1940	14.007	18.211		
56	1978	12.106	13.775		

Con los resultados obtenidos se procede a realizar la gráfica de correlación para obtener el valor del CBR como se presenta en la figura 98.

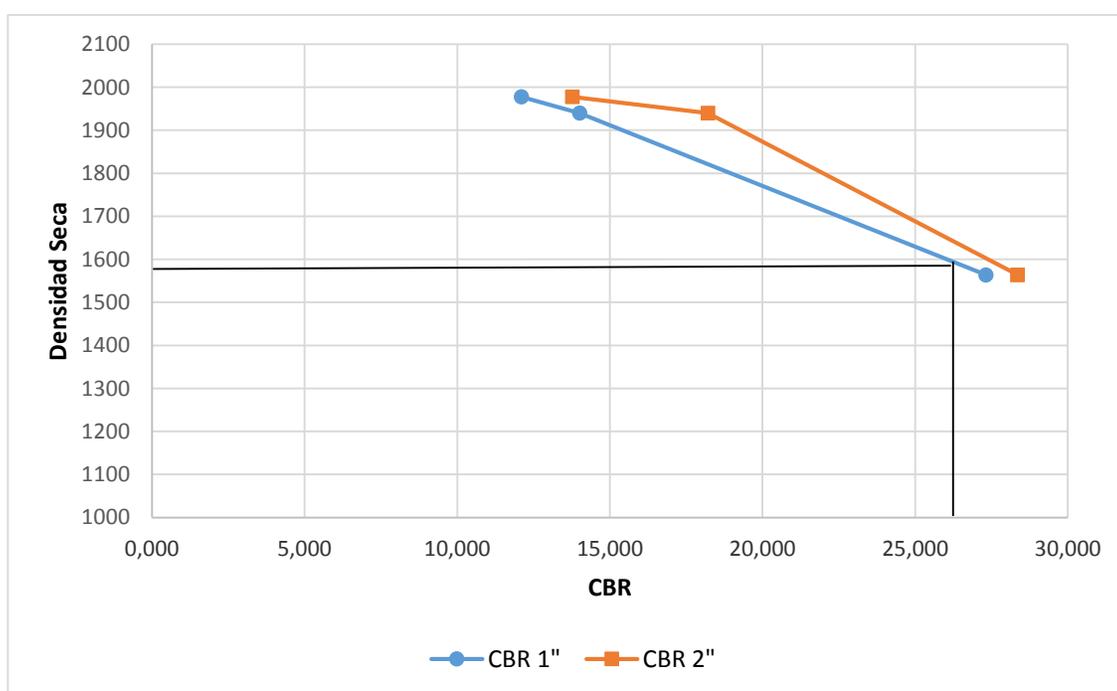


Figura 97 *Curva de Diseño CBR*

De esta manera obteniendo un CBR=25.6, categorizando a la subrasante de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, como una S3, según el Capítulo 5 de "Diseño de pavimentos flexibles" desarrollado por el Ministerio de obras públicas y comunicaciones.

4.7 Diseño de Mezcla Asfáltica

Para obtener el diseño definitivo de la mezcla asfáltica se enfocó en la correcta realización cada uno de los ensayos, y de esta manera cumplir los parámetros de calidad estipulados por la normativa vigente del Ecuador MTOP F001. Obtenido los siguientes resultados.

4.7.1 Agregados Pétreos

4.7.1.1 Máquina de los ángeles “Abrasión”

Para la comprobación del desgaste del material granular y corroborar que cumpla con las condiciones estipuladas presentadas en la normativa MTOP, se presentan los resultados obtenidos en la tabla 52.

Tabla 52

Resultados de abrasión de agregado grueso

	Peso agregado pasante de 19 mm y retenido en 12.5 mm	2501	gr
	Peso agregado pasante de 12.5 mm y retenido en 9.5 mm	2499.58	gr
B	masa inicial de la muestra de ensayo	5000.58	gr
C	masa de la muestra retenida en el tamiz de #12 (1.70mm)	3241.4	gr

Valor de la degradación en porcentaje (%)

$$D = \frac{B - C}{B} \times 100$$

$$D = \frac{5000.58 - 3241.4}{5000.58} \times 100$$

$$D = 35.18\%$$

De acuerdo con la normativa MTOP-001F-2002 sección 811.2.02, el desgaste máximo que puede soportar el agregado grueso es del 40%, trascurridas 500 revoluciones en la máquina de los ángeles, por lo tanto el agregado utilizado para el presente Proyecto cumple con los lineamientos establecidos, al presentar un desgaste del **35.18%**.

4.7.1.2 Curva granulométrica estabilizada

Para obtener exactitud en el diseño de la mezcla asfáltica, se realizó una estabilización exacta de la curva, misma que se basa en completar la faja granulométrica presentada por la normativa MTOP-F001. La tabla 53 presenta la faja de diseño utilizada.

Tabla 53
Estabilización granulométrica de diseño

tamices	porcentajes que pasa			%retenido acumulado	% retenido	gramos
	min	Máx.	% promedio pasa			
3/4 " (19,0 mm)	100	100	100	0	0	0
1/2"(12,5mm)	90	100	95	5	5	56.9
3/8 " (9,51 mm)	67	87	77	23	18	183.3
No. 4 (4,76 mm)	44	74	59	41	18	252.5
No. 8 (2.36 mm)	28	58	43	57	16	190.7
No. 16(1,18 mm)	20	46	33	67	10	118.8
No. 30(0,6 mm)	13	33	23	77	10	115.6
No. 50(0,30mm)	5	21	13	87	10	129.3
No. 100(0,15 mm)	4	16	10	91	4	42.4
No. 200(0,075 mm)	2	10	6	94	4	38.2
Pasante No. 200					6	71.7
					100	1199.4
Peso total	1200	gr				

La figura 99 presenta la curva estabilizada, misma que se encuentra exactamente en el punto medio de sus límites superior e inferior.

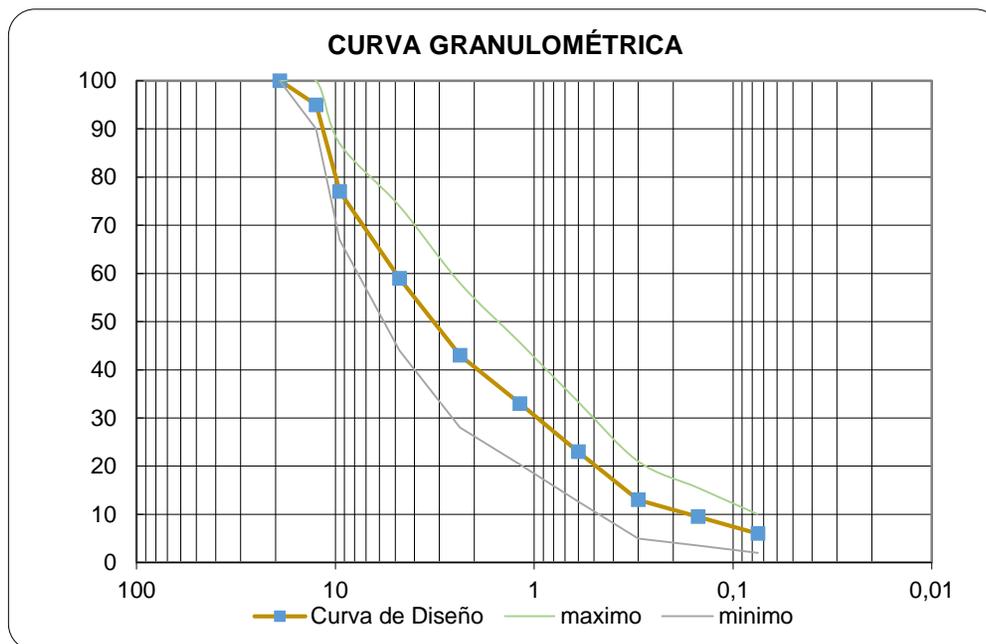


Figura 98 Curva granulométrica estabilizada

La estabilización granulométrica realizada es correcta, al encontrarse perfectamente centrada entre sus límites superior e inferior de la franja de 1/2" como se plantea en el diseño, y como lo especifica la normativa actual MTOP-001F, en la tabla 405-5.1.

4.7.1.3 Gravedad específica para agregados gruesos

Tomando como base la normativa INEN 857 para el desarrollo del ensayo, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 54.

Tabla 54.
Resultados gravedad específica para agregado grueso

Graduación	Densidad relativa aparente	Gravedad específica a SSS	Densidad relativa (Gravedad específica)
	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)
1/2"	2.582	2.505	2.457
3/8"	2.544	2.453	2.394
#4	2.468	2.346	2.262

De acuerdo a la normativa INEN 857, la aproximación de absorción obtenidos tendrán una aproximación a 0.1%, cumpliendo los resultados obtenidos con las condiciones planteadas en la normativa al obtener una variación de **0.09%**

4.7.1.4 Gravedad específica para agregados finos

De manera similar, se realizó la gravedad específica para los agregados finos, tamaño nominal menor al tamiz No. 4 (4.75 mm). (Tabla 55).

Tabla 55

Gravedad específica para agregado fino

Graduación	Densidad relativa aparente	Gravedad específica a SSS	Densidad relativa (Gravedad específica)
	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)
Pasante #4, retenido #8	2.185	2.137	2.097
Pasante #8, retenido #16	2.074	2.041	2.011
Pasante #16, retenido #30	2.209	2.166	2.131
Pasante #30, retenido #50	2.125	2.113	2.103
Pasante #50, retenido #100	2.124	2.093	2.066
Pasante #100, retenido #200	2.066	2.043	2.022
Pasante # 200	2.025	2.015	2.005

Con las condiciones planteadas en la normativa INEN 856, misma que expresa que la diferencia entre cada una de las densidades no deberá exceder en un 1%, los resultados obtenidos cumple con las condiciones planteadas al obtener un rango de variación del **0.05%**.

4.7.2 Asfalto AC-20

Mediante la realización de los ensayos descritos en el apartado 3.7.2 para emulsiones asfálticas, se presentan los resultados obtenidos en cada uno de ellos

4.7.2.1 Ductilidad

La emulsión asfáltica utilizada en el ensayo alcanzo una longitud de 104 cm cumpliendo la especificación estipulada por la MTOP F001 de ser mayor a 100 cm como se observa en la figura 100.



Figura 99 Ductilidad > 100cm

4.7.2.2 Penetración

El ensayo se realizó en dos muestras con 6 penetraciones en cada una de ellas obteniendo los resultados detallados en la tabla 56.

Tabla 56
Resultados de penetración

lectura (mm/10)	muestras	
	P1	P2
1	67	65
2	71	69
3	66	63
4	65	65

5	66	64
6	64	63
promedio	66.5	64.8
prom total	65.67	

4.7.2.3 Punto de reblandecimiento

Los resultados obtenidos en el ensayo se detallan en la tabla 57, donde se puede apreciar que cumple la recomendación planteada por la normativa, MTOP-F00, donde se estipula que la diferencia de los 2 valores no debe exceder en 1°C.

Tabla 57

Punto de reblandecimiento

Punto de Reblandamiento	
esfera	Temperatura (°C)
1	49.5
2	50
Promedio	49.75

4.7.2.4 Índice de penetración

Con los valores obtenidos en los dos ensayos anteriormente mencionados, se procede a calcular el índice de penetración de la emulsión asfáltica, utilizando las ecuaciones presentadas a continuación:

$$A = 50 \left[\frac{\log 800 - \log Pen}{Tab - 25} \right] \quad \text{Ecuación 23}$$

$$IP = \frac{20 - 10 * A}{A + 1} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$A = 50 \left[\frac{\log 800 - \log 65.67}{49.75 - 25} \right]$$

$$A = 2.19$$

$$IP = \frac{20 - 10 * 2.19}{2.19 + 1}$$

$$IP = -0.61$$

4.7.2.5 Punto de inflamación

La temperatura máxima de calentamiento del material bituminoso registrada se presenta en la tabla 58.

Tabla 58
Punto de inflamación

Punto de inflamación	
Medida	Temperatura (°C)
	285

4.7.2.6 Gravedad específica

Se procedió a calcular la gravedad específica del material bituminoso, del cual se obtuvieron los resultados detallados en la tabla 59.

Tabla 59
Gravedad específica de Asfalto

Densidad y gravedad específica del asfalto		
símbolo	datos	
A	57.48	gr
B	125.15	gr
C	97	gr
D	125.87	gr
Ya	0.998	
gravedad específica	1.019	
densidad	1.016	gr/cm3

Concluido los ensayos, se procede a comparar con los resultados obtenidos con la normativa MTOP-F001, para verificación de cumplimiento con lo allí planteado. Presentado en la tabla 60.

Tabla 60
Caracterización de asfalto

Ensayos	Datos Calculados	Valores para asfalto con índice de penetración 60-70		Verificación
		Mínimo	Máximo	
Penetración (25 °C, 100 gr, 5 seg) mm/10	65.67	60	70	Cumple
Punto de reblandamiento (°C)	49.75	48	57	Cumple
Índice de penetración	-0.61	-1,5	1.5	Cumple
Ductilidad (25 °C. 5cm/minuto), cm	105	100		Cumple
Punto de inflamación, copa de Cleveland (°C)	285	232		Cumple
Densidad relativa	1.016	1.00		Cumple

De acuerdo a la normativa MTOP-001F tabla 810.2.1 el asfalto utilizado para el diseño de la mezcla asfáltica cumple con las condiciones planteadas por esta, encontrándose en los rangos de aceptación y aprobación.

4.7.3 Muestra Asfáltica de diseño

Una vez comprobado que los materiales cumplen las condiciones de diseño se procedió a la realización de las briquetas, cumpliendo las especificaciones planteadas en el diseño Marshall, obteniendo los resultados presentados a continuación:

4.7.3.1 Elaboración de briquetas

Se realizaron 15 briquetas, 3 por cada porcentaje de asfalto como se observa en la figura 101, y lo establece la normativa MTOP-F001, una vez realizado este proceso se realizó la caracterización mecánica de las probetas realizadas.



Figura 100 Briquetas realizadas

4.7.3.2 Densidad bulk

Ensayo realizado para cada una de las briquetas elaboradas previamente, presentando en la tabla 61 los resultados obtenidos, y mostrando el comportamiento de cada uno de ellas en la figura 102.

Tabla 61
Densidad Bulk

resumen de resultados			
porcentaje de asfalto	gravedad especifica bulk	densidad bulk	% agua absorbida
5 %	1.923	1.917	0.49%
5.5 %	1.969	1.963	0.36%
6 %	2.021	2.015	0.53%
6.5 %	2.059	2.053	0.61%
7 %	1.999	1.993	0.45%

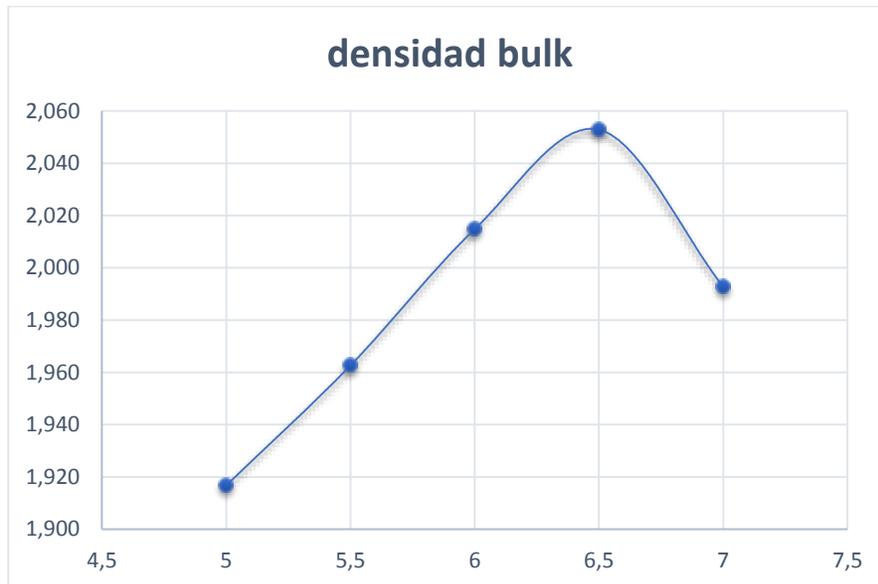


Figura 101 Tendencia de densidad bulk

4.7.3.3 Estabilidad y Flujo, Método Marshall

De manera similar al ensayo bulk se procedió a obtener la estabilidad y flujo para cada una de las probetas, obteniendo los resultados presentados en la tabla 62, a su vez en las figuras 103 y 104 se presenta el comportamiento de las probetas.

Tabla 62
Estabilidad y flujo

resumen de resultados		
Porcentaje de asfalto (%)	estabilidad (lb)	flujo
5	1757.08	11.00
5.5	2032.07	13.00
6	2129.39	13.67
6.5	2226.65	14.33
7	2370.48	14.50

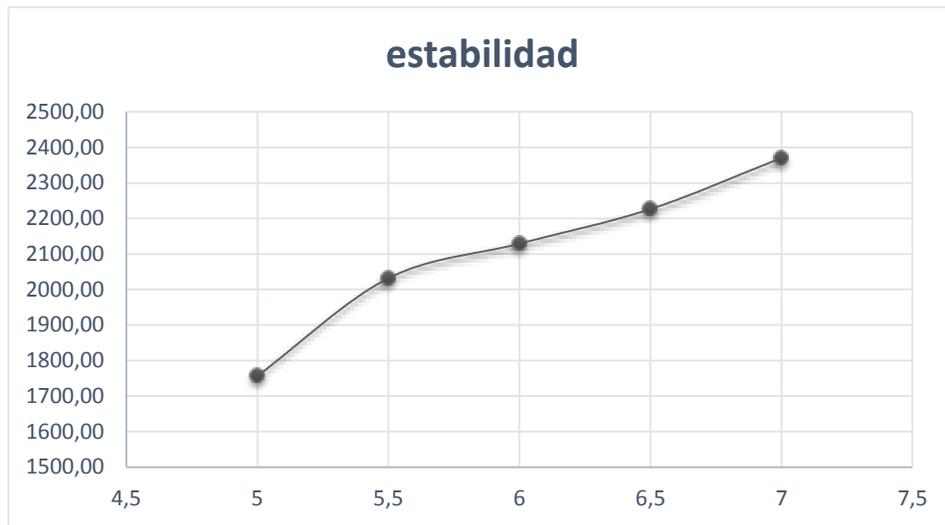


Figura 102 Estabilidad de mezclas asfálticas

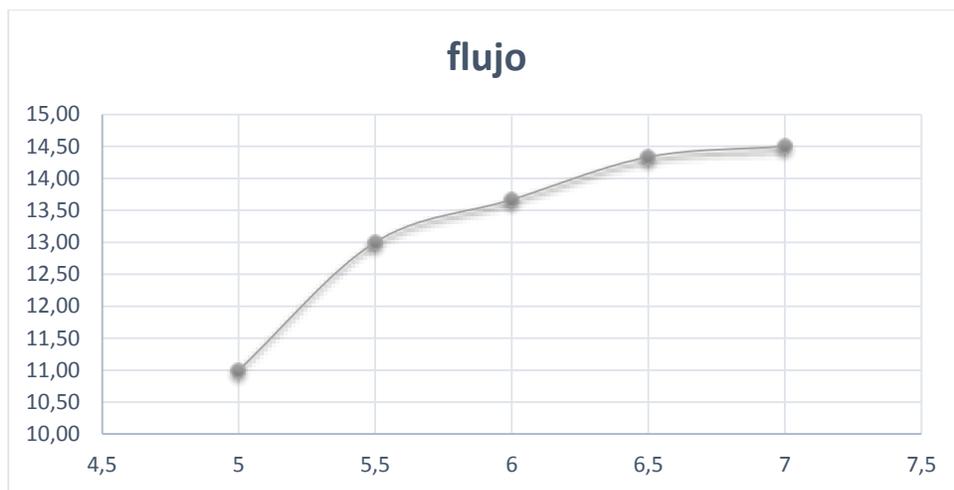


Figura 103 Flujo de mezclas asfálticas

4.7.3.4 Gravedad específica máxima teórica

Para el ensayo se tomó una probeta por cada porcentaje de asfalto, a su vez se utiliza la ecuación planteada para su cálculo, detallando los resultados obtenidos en la tabla 63, observando en la figura 105 su comportamiento.

$$\text{Gravedad específica máxima} = \frac{A}{A+D-E} * \gamma$$

Ecuación 25

Tabla 63
Ensayo RISE

Porcentaje de asfalto (%)	(A)	(D)	(E)	temperatura (°C)	densidad del agua para corrección por temperatura (g/cm3)	gravedad específica máxima (g/cm3)
	masa en el aire de la muestra seca (gr)	masa recipiente lleno con agua (gr)	masa recipiente lleno con agua y muestra			
5	1248.6	4827.7	5504.4	26	0.996814	2.176
5.5	1263.0	4829.5	5500.0	22	0.997801	2.127
6	1262.8	4845.7	5499.4	20	0.998234	2.070
6.5	1269.7	4878.0	5538.8	19	0.998435	2.082
7	1275.5	4833.8	5497.1	18	0.998625	2.081

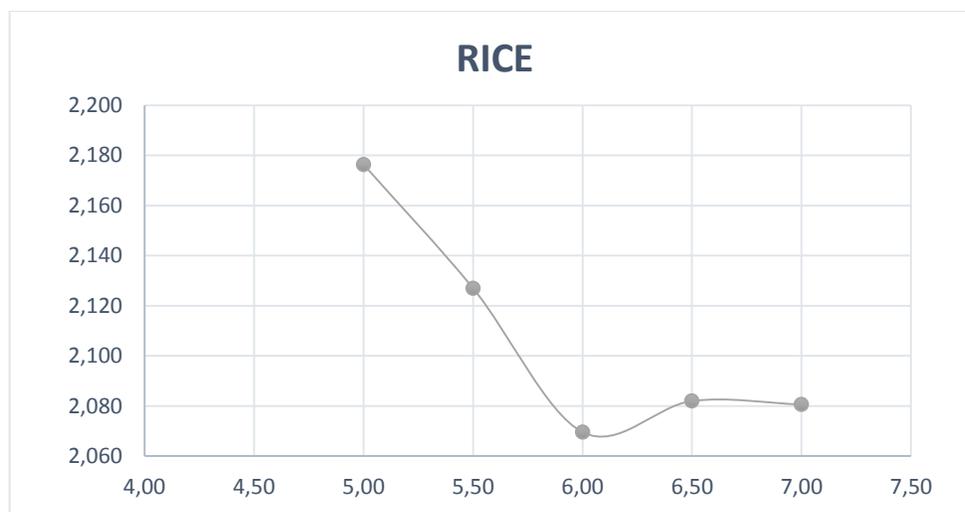


Figura 104 RISE

4.7.3.5 Análisis volumétrico de estabilidad

Detallando en la tabla 64 un resumen de estabilización para obtener la muestra de diseño definitiva.

Tabla 64
Resumen de Estabilización total

porcentaje de asfalto (%)	briquetas	contenido de asfalto en la mezcla	contenido de agregado en la mezcla (%)	peso en el aire	peso en el agua	peso saturado superficie seca	Volumen de la briqueta (cm ³)	gravedad específica bulk	Gravedad específica teorica maxima (Gmm)	vacios de aire (Va)	vacios en el agregado mineral (VAM)	vacios llenos de asfalto (VFA)	estabilidad			flujo (mm)	gravedad específica efectiva	asalto absorbido	asfalto efectivo	relacion filler/betu
													lectura estabilidad (lb)	Factor C.	estabilidad corregida (lb)					
		pb	ps					Gmb	Gmm	Va	VAM	VFA			Gse	Pba	Pbe	RP		
5.00	M1	4.76	95.24	1207.47	572.54	1212.63	640.09	1.889					2083.84	0.761	1585.80	11.50				
	M2			1234.90	602.29	1238.22	635.93	1.944						2644.84	0.761	2012.72	10.50			
	M3			1215.45	587.24	1216.33	629.09	1.934						2192.30	0.763	1672.72	11.00			
	promedio								1.923	2.176	11.660	15.813	26.259		1757.08	11.00	2.31	2.69	2.20	2.73
5.50	M1	5.21	94.79	1231.02	605.02	1233.52	628.50	1.961					2401.96	0.763	1832.70	13.00				
	M2			1238.59	608.86	1240.55	631.69	1.963						2857.36	0.761	2174.45	13.50			
	M3			1167.50	579.80	1169.76	589.96	1.981						2745.16	0.761	2089.07	12.50			
	promedio								1.969	2.127	7.446	14.204	47.580		2032.07	13.00	2.26	1.81	3.50	1.72
6.00	M1	5.66	94.34	1245.92	621.04	1250.02	628.98	1.983					2621.52	0.761	1994.98	13.00				
	M2			1240.80	604.29	1243.50	639.21	1.943						2970.66	0.761	2260.67	14.00			
	M3			1238.97	661.26	1241.88	580.62	2.136						2802.25	0.761	2132.51	14.00			
	promedio								2.021	2.070	2.351	12.339	80.951		2129.39	13.67	2.21	0.66	5.03	1.19
6.50	M1	6.10	93.90	1252.94	647.83	1256.77	608.94	2.060					3046.56	0.763	2324.53	14.00				
	M2			1269.58	643.29	1272.24	628.95	2.021						2863.96	0.761	2179.47	15.00			
	M3			1247.30	656.35	1252.00	595.65	2.096						2859.34	0.761	2175.96	14.00			
	promedio								2.059	2.082	1.101	11.104	90.087		2226.65	14.33	2.23	1.23	4.95	1.21
7.00	M1	6.54	93.46	1224.51	600.80	1224.62	623.82	1.965					3490.30	0.763	2663.10	14.00				
	M2			1247.10	653.27	1251.95	598.68	2.085						3182.08	0.763	2427.93	14.50			
	M3			1217.99	594.52	1221.27	626.75	1.946						2654.96	0.761	2020.42	15.00			
	promedio								1.999	2.081	3.936	14.113	72.111		2370.48	14.50	2.24	1.45	5.19	1.16

Teniendo como resultados finales los presentados a continuación, mismos que son comparadas con la normativa vigente MTOP, de similar forma presentando las curvas de tendencia para cada uno de los resultados obtenidos.

Tabla 65*Cumplimiento de análisis volumétrico*

Gsb <	Gse	< Gsa
2.175	2.251	2.273

Gsb < Gse < Gsa Cumple

Tabla 66*Diseño de mezcla definitiva*

Porcentaje de asfalto (%)	gravedad especifica bulk	vacíos de aire (Va)	vacíos en el agregado mineral (VAM)	vacíos llenos de asfalto (VFA)	estabilidad	flujo (mm)
5.00	1.923	11.660	15.813	26.259	1757.083	11.000
5.50	1.969	7.446	14.204	47.580	2032.071	13.000
6.00	2.021	2.351	12.339	80.951	2129.387	13.667
6.50	2.059	1.101	11.104	90.087	2226.652	14.333
7.00	1.999	3.936	14.113	72.111	2370.484	14.500

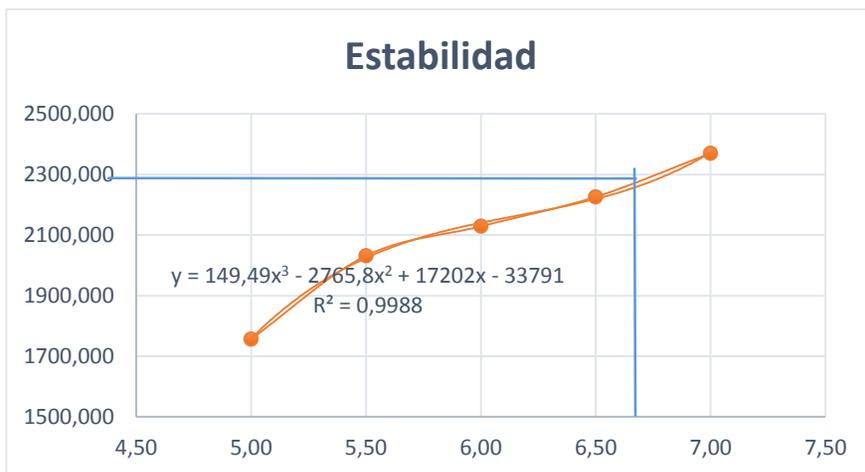


Figura 105 Estabilidad para mezcla definitiva

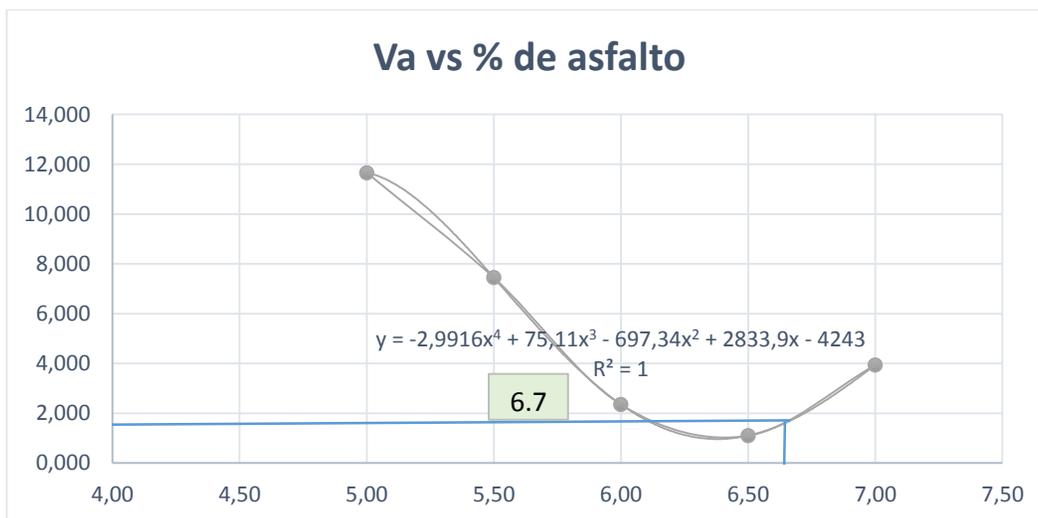


Figura 106 Relación de vacíos vs porcentaje de asfalto

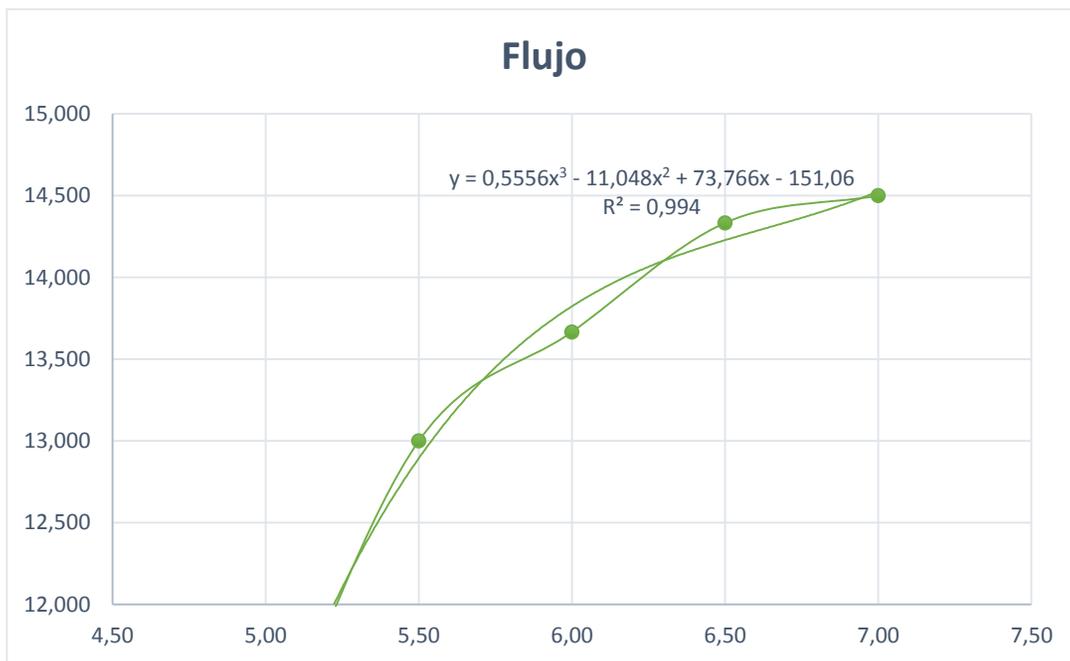


Figura 107 Flujo para mezcla definitiva

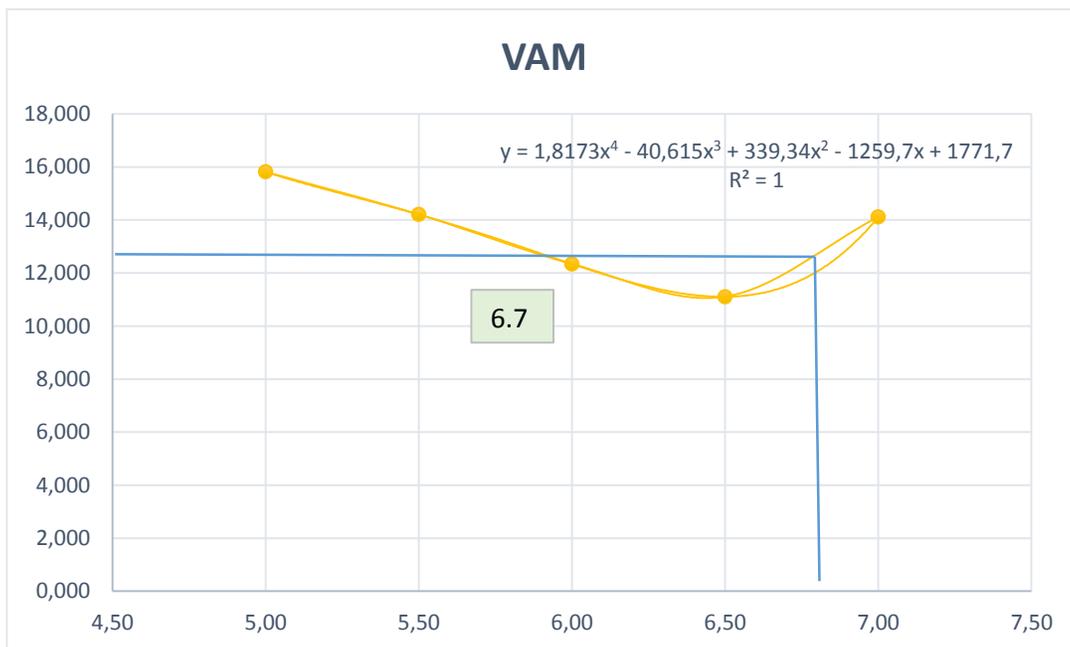


Figura 108 Volumen de agregado mineral

Tabla 67
Comparación MTOP

COMPROBACION norma MTOP-F001 2002						
% asfalto	estabilidad (lb)		flujo		relación filler/betun	
	mínimo 1000		entre 8 -16		0.8-1.25	
5.00	1757.08	OK	11.00	OK	2.73	no cumple
5.50	2032.07	OK	13.00	OK	1.72	no cumple
6.00	2129.39	OK	13.67	OK	1.19	OK
6.50	2226.65	OK	14.33	OK	1.21	Ok
7.00	2370.48	OK	14.50	OK	1.16	OK

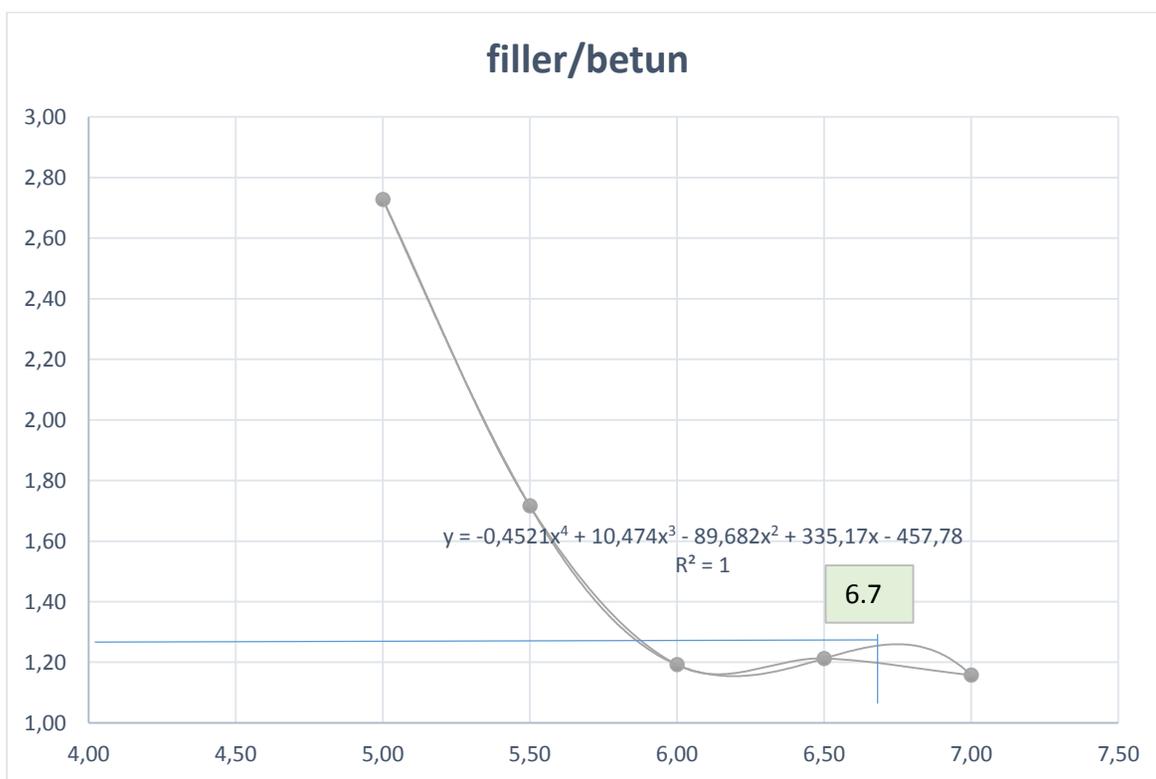


Figura 109 Relación filler/betun

Tabla 68
Diseño mezcla asfáltica

Comprobación norma MTOP 2002 tabla 405.5.4								
% Asfalto	Estabilidad (lb) mínimo 1000		Flujo entre 8- 16		Relación filler/betún		VAM (%) mínimo 13	
6.7	2268.88	OK	13.88	OK	1.19	OK	13	OK

4.7.3.6 Tracción Indirecta “Modulo de elasticidad”

Ensayo mediante el cual se estableció el módulo de elasticidad de la nueva mezcla asfáltica detallando los valores obtenidos en la tabla 69.

Tabla 69
Ensayo compresión diametral para material bituminoso

Nombre	M. Elástico Tracción indirecta	Max. Fuerza Calc. Entre áreas	Max. Desplazamiento Calc. entre áreas	Max. Deformación Calc. Entre áreas
Parámetros	0-0.5 kgf/mm ²	Áreas	Áreas	Áreas
Unidad	Kgf/mm ²	kgf	mm	%
1	59.3179	611.593	2.27870	2.25346
2	59.6267	517.137	2.08397	2.06170
3	58.617	509.361	1.54211	1.52518
Media	59.1872	546.030	1.96826	1.94678
Desviación estándar	28.3741	56.9119	0.38168	0.37750

Mismo que presenta el siguiente comportamiento como se observa en la figura 111

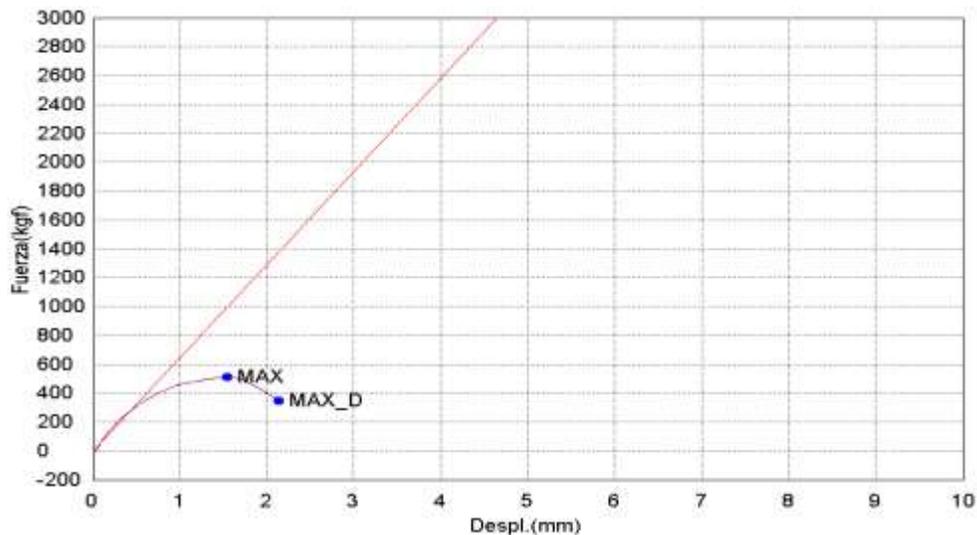


Figura 110. Módulo de elasticidad

4.8 Sistema de adquisición de datos

Mediante el desarrollo y puesta en ejecución del SAD se procedió a tomar las variaciones de temperatura y humedad en el pavimento de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Al finalizar el periodo de toma de datos en los 20 días de estudio, se deberá tener un total de 28800 datos, pero dado a que algunas veces se pierde información ya sea por atenuación de la señal inalámbrica o su línea de vista ha sido interrumpida se considera un 5% de error en la toma de datos. Lo cual no se considera problema ya que se tenía previsto según el test de rango que se realizó, además la cantidad de datos obtenida es suficiente para realizar el estudio y análisis.

Se toma en cuenta que el número de datos obtenidos son independientes, es decir se tendrá la misma cantidad para cada uno de los sensores colocados como se detalla en la figura 112. Debido a la gran cantidad de datos se realizaron periodos de análisis de 8 horas, de esta manera se presentan espectros de comportamiento estables.



Figura 111 Ubicación de los sensores

A continuación, en la tabla 70 se presentan los valores obtenidos por el SAD para cada uno de los sensores, a su vez las figuras detallaran su comportamiento. Se presentan 5 gráficas para cada uno de los sensores, en primer lugar se toman los sensores 1 y 3 para la comparativa entre la muestra existente en la zona de estudio y la muestra nueva que se diseñó, la segunda representa un comportamiento similar a la primera gráfica, recordando que en esta los sensores 2 y 4 se encuentran a una profundidad mayor. La tercera grafica representa el comportamiento de los sensores en la muestra nueva y de manera similar la cuarta grafica representa el comportamiento de los sensores en la muestra existente en la zona de estudio. Y para finalizar la quinta grafica representa el comportamiento del sensor de humedad.

Tabla 70
Datos de temperatura

Date	Time	Contador	Sensor T1	Sensor T2	Sensor T3	Sensor T4
26/04/2018	11:24:15 AM	1	24.76	24.1	23.3	21.67
26/04/2018	11:25:15 AM	2	25.7	24.21	23.21	22.78
26/04/2018	11:26:16 AM	3	23.56	22.12	21.98	20.19
26/04/2018	11:27:17 AM	4	22.56	21.6	22.01	20.13

CONTINÚA 

26/04/2018	11:28:18 AM	5	18.19	18.25	17.25	16.94
26/04/2018	11:29:18 AM	6	20.12	20.19	18.62	18.37
26/04/2018	11:30:19 AM	7	17.75	17.87	17.25	17.06
26/04/2018	11:31:20 AM	8	21.12	21.19	19.19	18.87
26/04/2018	11:32:21 AM	9	25.19	25.25	22.56	22.12
26/04/2018	11:33:21 AM	10	24.26	24.1	23.25	22.15
26/04/2018	11:34:22 AM	11	22.15	21.54	21.3	20.12
26/04/2018	11:35:23 AM	12	23.11	21.95	22.1	20.12
26/04/2018	11:36:24 AM	13	24.23	23.05	23.65	21.54
26/04/2018	11:37:24 AM	14	25.43	23.56	24.31	22.14
26/04/2018	11:38:25 AM	15	24.34	23.7	23.21	21.89
26/04/2018	11:39:26 AM	16	25.67	23.33	22.67	21.06
26/04/2018	11:40:27 AM	17	21.31	21.31	19.44	19.12
26/04/2018	11:41:27 AM	18	31	31.06	27.81	27.25
26/04/2018	11:42:28 AM	19	29.56	27.63	28.21	27.1
26/04/2018	11:44:29 AM	20	28.74	26.85	28.1	26.14
26/04/2018	11:45:30 AM	21	28.31	27.1	27.31	25.86
26/04/2018	11:46:31 AM	22	28.21	26.45	26.15	25.01
26/04/2018	11:47:32 AM	23	28.12	26.85	26.74	24.96
26/04/2018	11:48:32 AM	24	29.1	27.56	28.65	27.01
26/04/2018	11:49:33 AM	25	29.37	29.37	26.37	25.87
26/04/2018	11:50:34 AM	26	26	25.21	25.12	25.04
26/04/2018	11:51:35 AM	27	18.05	18	17.81	17.81
26/04/2018	11:52:35 AM	28	29.62	28.25	27.25	27.81
26/04/2018	11:53:36 AM	29	19	19.12	18.12	17.87
26/04/2018	11:54:37 AM	30	18.75	18.75	18.12	17.69
26/04/2018	11:55:38 AM	31	20.75	20.75	19.5	19.19
26/04/2018	11:56:38 AM	32	19.62	19.62	18.37	18.12
26/04/2018	11:57:39 AM	33	20.44	20.5	19.06	18.81
26/04/2018	11:58:40 AM	34	19.37	19.5	18.44	18.19
26/04/2018	11:59:41 AM	35	18	18.06	17.25	17

26/04/2018	12:00:41 PM	36	18.94	18.94	18.5	18.19
26/04/2018	12:01:42 PM	37	24.87	23.94	23.25	22.62
26/04/2018	12:02:43 PM	38	15.44	15.5	15.63	15.38
26/04/2018	12:03:44 PM	39	27.75	25.87	25.44	25.12
26/04/2018	12:04:44 PM	40	16.75	16.69	16.62	16.12
26/04/2018	12:05:45 PM	41	15.69	15.81	15.88	15.63
26/04/2018	12:06:46 PM	42	15.56	15.69	15.75	15.5
26/04/2018	12:07:46 PM	43	16.5	16.62	16.5	16.25
26/04/2018	12:08:47 PM	44	17.12	17.25	17.19	16.75
26/04/2018	12:09:48 PM	45	15.94	15.94	16.12	15.63
26/04/2018	12:10:49 PM	46	15.5	15.5	16	15.44
26/04/2018	12:11:49 PM	47	16.5	16.31	16.87	16.31
26/04/2018	12:12:50 PM	48	18.44	17.56	18.37	18.06
26/04/2018	12:13:51 PM	49	30.31	27.62	28.19	26.87
26/04/2018	12:14:52 PM	50	15.75	15.56	16.37	15.56
26/04/2018	12:15:52 PM	51	18.87	18.37	19.12	18.37
26/04/2018	12:16:53 PM	52	17.12	16.62	17.56	17.06
26/04/2018	12:17:54 PM	53	15.94	15.63	16.69	15.63
26/04/2018	12:18:55 PM	54	17.94	17.31	18.19	17.12
26/04/2018	12:19:55 PM	55	18.75	18.19	18.81	17.31
26/04/2018	12:20:56 PM	56	16.12	15.69	16.87	15.75
26/04/2018	12:21:57 PM	57	16.12	15.69	16.94	15.69
26/04/2018	12:22:58 PM	58	16.19	15.69	16.94	15.69
26/04/2018	12:23:58 PM	59	16.19	15.69	16.94	15.75
26/04/2018	12:24:59 PM	60	16.25	15.81	17	15.81
26/04/2018	12:26:00 PM	61	16.75	16.31	17.25	16.12
26/04/2018	12:27:00 PM	62	22.87	21.87	22	21.06
26/04/2018	12:28:01 PM	63	24.81	24.06	23.75	22
26/04/2018	12:29:02 PM	64	20.69	19.75	20.12	18.87
26/04/2018	12:30:03 PM	65	16.44	15.88	17	15.94
26/04/2018	12:31:03 PM	66	17.31	16.69	17.75	16.94

26/04/2018	12:32:04 PM	67	17.06	16.5	17.5	16.69
26/04/2018	12:33:05 PM	68	27.5	26	26.19	26.12
26/04/2018	12:34:06 PM	69	19.15	19.1	18.25	18.06
26/04/2018	12:35:06 PM	70	22.25	22.18	21.62	22.56
26/04/2018	12:39:09 PM	71	25.87	23.85	24.25	22.87
26/04/2018	12:43:12 PM	72	22.84	20.45	21.62	20.65
26/04/2018	12:48:16 PM	73	20.15	18.05	19.12	19.03
26/04/2018	12:49:17 PM	74	19.81	19.56	18.87	18.44
26/04/2018	12:50:17 PM	75	19.75	19.56	18.87	18.44
26/04/2018	12:51:18 PM	76	19.75	19.5	18.87	18.44
26/04/2018	12:52:19 PM	77	19.75	19.5	18.87	18.44
26/04/2018	12:53:20 PM	78	19.75	19.5	18.81	18.44
26/04/2018	12:54:20 PM	79	19.69	19.5	18.81	18.44
26/04/2018	12:55:21 PM	80	19.69	19.44	18.81	18.44
26/04/2018	12:56:22 PM	81	19.69	19.44	18.81	18.34
26/04/2018	12:57:23 PM	82	19.62	19.44	18.81	18.44
26/04/2018	12:58:23 PM	83	19.62	19.44	18.81	18.44
26/04/2018	12:59:24 PM	84	19.62	19.37	18.81	18.38
26/04/2018	1:00:25 PM	85	19.62	19.37	18.81	18.44
26/04/2018	1:01:26 PM	86	19.62	19.37	18.87	18.44
26/04/2018	1:02:26 PM	87	19.62	19.37	18.87	18.44
26/04/2018	1:03:27 PM	88	19.62	19.31	18.87	18.44
26/04/2018	1:04:28 PM	89	19.56	19.31	18.87	18.37
26/04/2018	1:05:29 PM	90	19.56	19.31	18.87	18.37
26/04/2018	1:06:29 PM	91	19.56	19.31	18.87	18.44
26/04/2018	1:07:30 PM	92	19.56	19.31	18.87	18.37
26/04/2018	1:08:31 PM	93	19.56	19.31	18.87	18.37
26/04/2018	1:09:32 PM	94	19.56	19.25	18.87	18.37
26/04/2018	1:10:32 PM	95	19.56	19.25	18.87	18.37
26/04/2018	1:11:33 PM	96	19.56	19.25	18.87	18.37
26/04/2018	1:12:34 PM	97	19.5	19.25	18.87	18.37

26/04/2018	1:13:35 PM	98	19.5	19.25	18.94	18.37
26/04/2018	1:14:35 PM	99	19.5	19.25	18.94	18.37
26/04/2018	1:15:36 PM	100	19.5	19.25	18.94	18.37

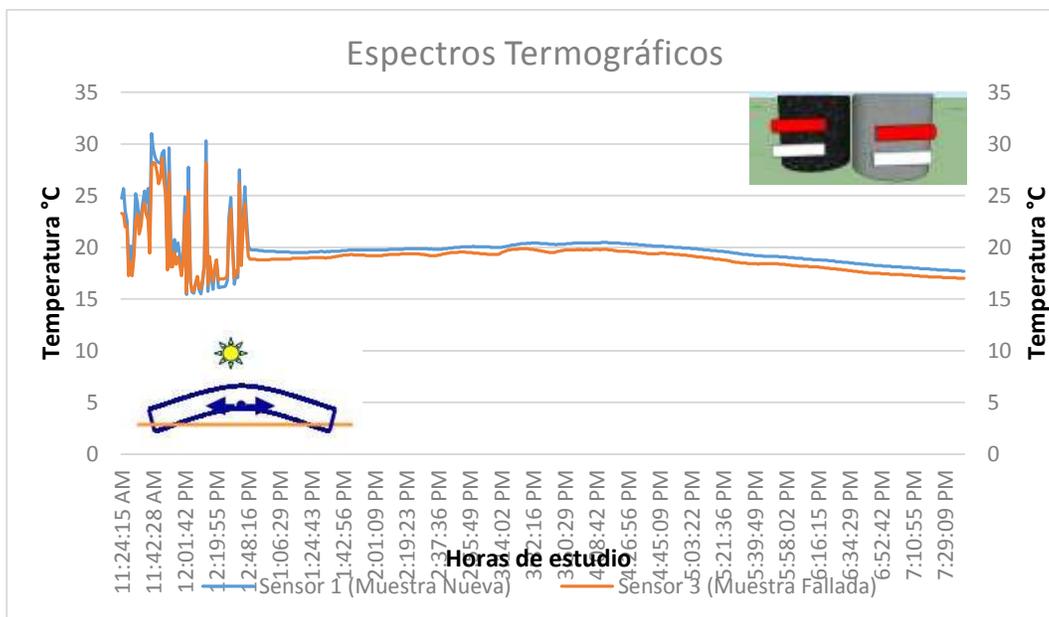


Figura 112 Espectro de temperatura Sensor 1 y 3

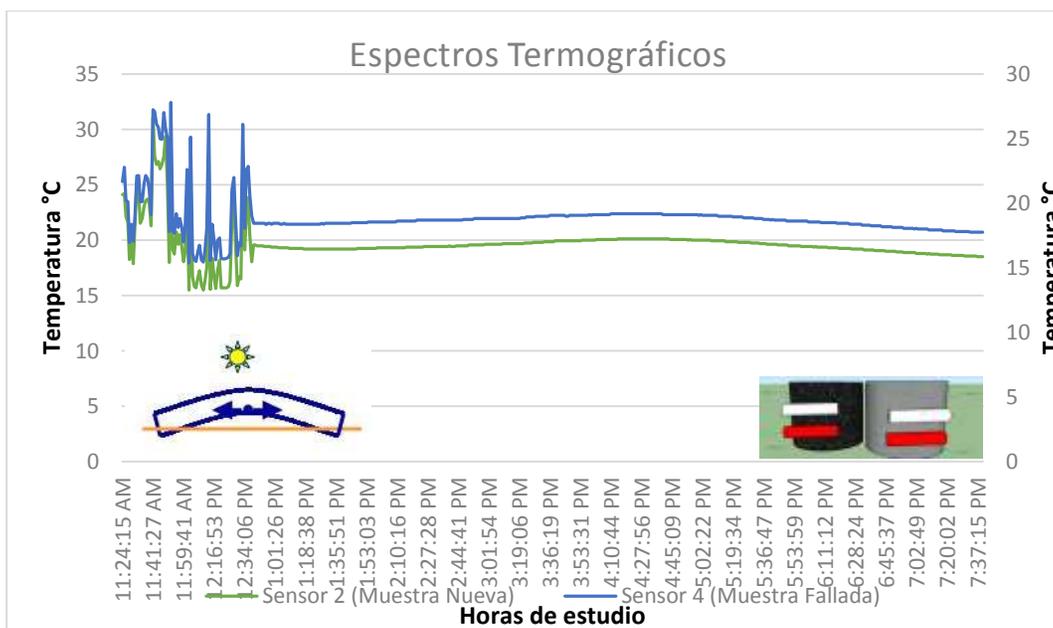


Figura 113 Espectro de temperatura Sensor 2 y 4

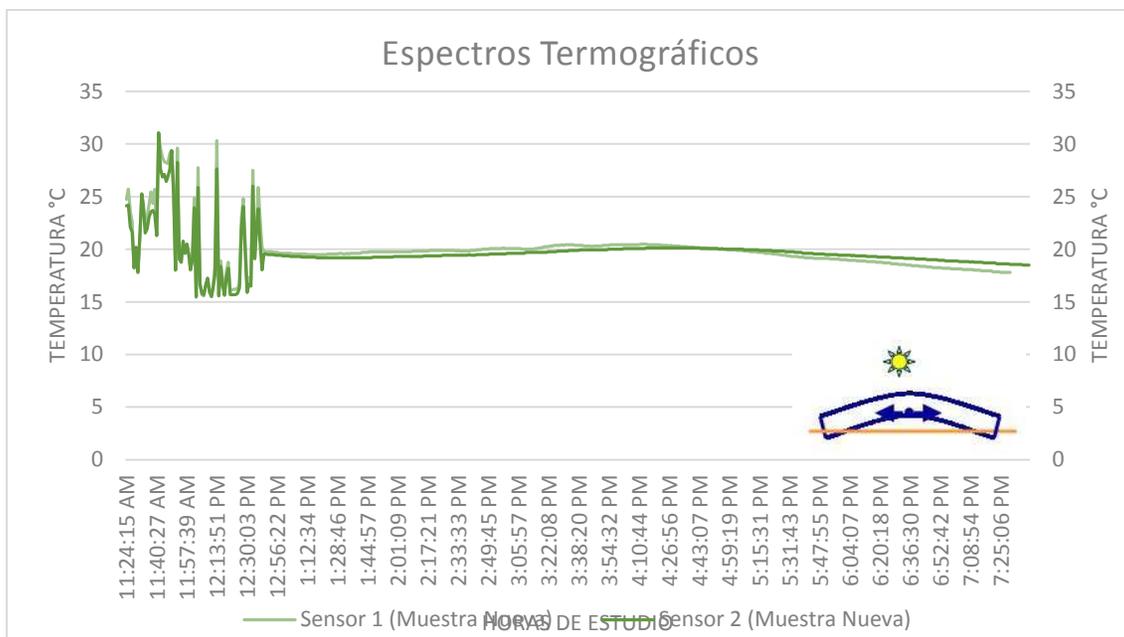


Figura 114 Espectro de temperatura Sensor 1 y 2

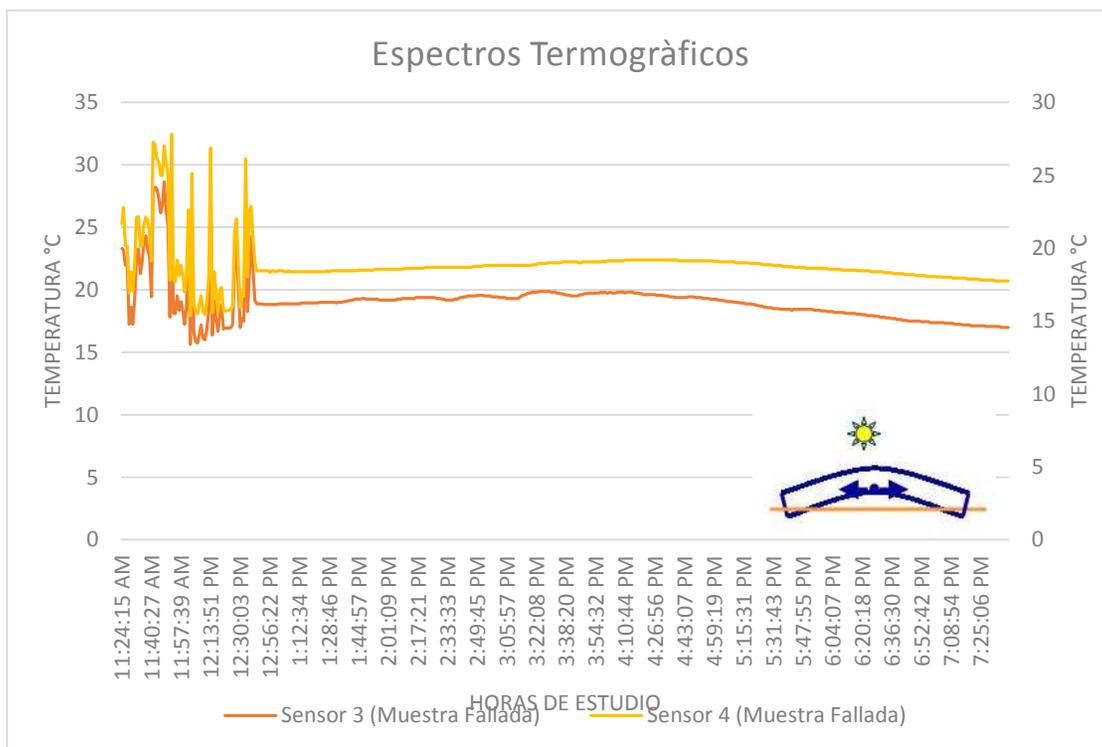


Figura 115 Espectros de temperatura sensor 3 y 4

Tabla 71
Datos de humedad

Fecha	Hora	Contador	S. Humedad
26/04/2018	11:24:15 AM	1	30%
26/04/2018	11:25:15 AM	2	28%
26/04/2018	11:26:16 AM	3	19%
26/04/2018	11:27:17 AM	4	15%
26/04/2018	11:28:18 AM	5	27%
26/04/2018	11:29:18 AM	6	28%
26/04/2018	11:30:19 AM	7	15%
26/04/2018	11:31:20 AM	8	30%
26/04/2018	11:32:21 AM	9	25%
26/04/2018	11:33:21 AM	10	16%
26/04/2018	11:34:22 AM	11	21%
26/04/2018	11:35:23 AM	12	17%
26/04/2018	11:36:24 AM	13	27%
26/04/2018	11:37:24 AM	14	15%
26/04/2018	11:38:25 AM	15	22%
26/04/2018	11:39:26 AM	16	16%
26/04/2018	11:40:27 AM	17	21%
26/04/2018	11:41:27 AM	18	27%
26/04/2018	11:42:28 AM	19	18%
26/04/2018	11:44:29 AM	20	16%
26/04/2018	11:45:30 AM	21	20%
26/04/2018	11:46:31 AM	22	15%
26/04/2018	11:47:32 AM	23	29%
26/04/2018	11:48:32 AM	24	27%
26/04/2018	11:49:33 AM	25	28%
26/04/2018	11:50:34 AM	26	20%
26/04/2018	11:51:35 AM	27	28%
26/04/2018	11:52:35 AM	28	22%
26/04/2018	11:53:36 AM	29	20%
26/04/2018	11:54:37 AM	30	21%
26/04/2018	11:55:38 AM	31	18%
26/04/2018	11:56:38 AM	32	24%
26/04/2018	11:57:39 AM	33	23%
26/04/2018	11:58:40 AM	34	28%
26/04/2018	11:59:41 AM	35	23%
26/04/2018	12:00:41 PM	36	16%

26/04/2018	12:01:42 PM	37	22%
26/04/2018	12:02:43 PM	38	28%
26/04/2018	12:03:44 PM	39	16%
26/04/2018	12:04:44 PM	40	29%
26/04/2018	12:05:45 PM	41	23%
26/04/2018	12:06:46 PM	42	18%
26/04/2018	12:07:46 PM	43	14%
26/04/2018	12:08:47 PM	44	28%
26/04/2018	12:09:48 PM	45	20%
26/04/2018	12:10:49 PM	46	16%
26/04/2018	12:11:49 PM	47	17%
26/04/2018	12:12:50 PM	48	25%
26/04/2018	12:13:51 PM	49	29%
26/04/2018	12:14:52 PM	50	21%
26/04/2018	12:15:52 PM	51	28%
26/04/2018	12:16:53 PM	52	22%
26/04/2018	12:17:54 PM	53	29%
26/04/2018	12:18:55 PM	54	23%
26/04/2018	12:19:55 PM	55	28%
26/04/2018	12:20:56 PM	56	26%
26/04/2018	12:21:57 PM	57	18%
26/04/2018	12:22:58 PM	58	21%
26/04/2018	12:23:58 PM	59	18%
26/04/2018	12:24:59 PM	60	20%
26/04/2018	12:26:00 PM	61	24%
26/04/2018	12:27:00 PM	62	24%
26/04/2018	12:32:04 PM	67	22%
26/04/2018	12:33:05 PM	68	14%
26/04/2018	12:34:06 PM	69	28%
26/04/2018	12:35:06 PM	70	15%
26/04/2018	12:39:09 PM	71	21%
26/04/2018	12:43:12 PM	72	30%
26/04/2018	12:48:16 PM	73	14%
26/04/2018	12:49:17 PM	74	24%
26/04/2018	12:50:17 PM	75	21%
26/04/2018	12:51:18 PM	76	24%
26/04/2018	12:52:19 PM	77	18%
26/04/2018	12:53:20 PM	78	20%
26/04/2018	12:54:20 PM	79	18%
26/04/2018	12:55:21 PM	80	19%
26/04/2018	12:56:22 PM	81	15%

26/04/2018	12:57:23 PM	82	26%
26/04/2018	12:58:23 PM	83	18%
26/04/2018	12:59:24 PM	84	25%
26/04/2018	1:00:25 PM	85	15%
26/04/2018	1:01:26 PM	86	19%
26/04/2018	1:02:26 PM	87	16%
26/04/2018	1:03:27 PM	88	15%
26/04/2018	1:04:28 PM	89	24%
26/04/2018	1:09:32 PM	94	16%
26/04/2018	1:10:32 PM	95	25%
26/04/2018	1:11:33 PM	96	20%
26/04/2018	1:12:34 PM	97	25%
26/04/2018	1:13:35 PM	98	20%
26/04/2018	1:14:35 PM	99	19%
26/04/2018	1:15:36 PM	100	24%

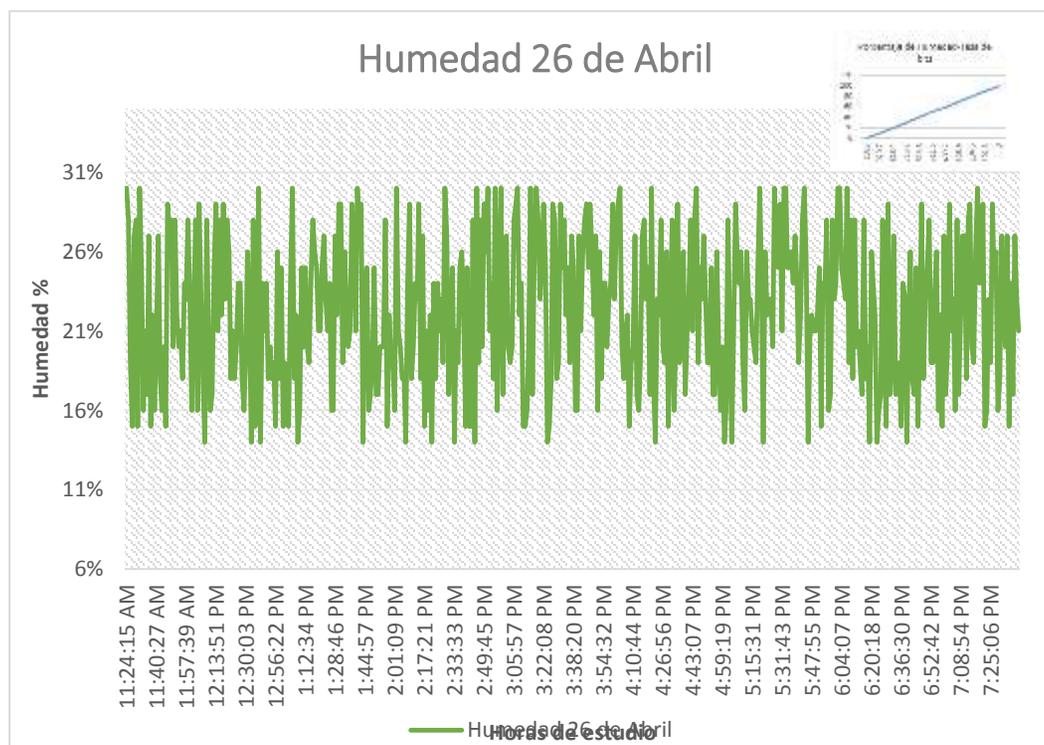


Figura 116 Espectro de humedad

Para verificar los datos y sus respectivas graficas de los demás días en estudio dirigirse al **“Anexo 9”**.

CAPITULO V

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La tecnología UAV/UAS facilitó la toma de fotografías ortodigitales y termográficas permitiendo su georreferenciación. Permitiendo determinar la presencia de patologías viales, además de optimizar recursos como tiempo, mano de obra y capital, a diferencia de los métodos convencionales.
- La altura utilizada en el proceso de toma de fotografías ortodigitales para obtener una resolución optima fue de 50 m, la cual permitió cumplir con el requerimiento de 1 pixel por cada 1 cm de zona de estudio.
- La irradiancia solar medida mediante el piranómetro, presentó curvas de masas, las cuales detallaron el comportamiento y variación de la luz solar en los días de estudio, debiéndose a que las condiciones climáticas no son uniformes, y estas dependen del periodo de análisis, para los meses de abril y mayo de 2018, se obtuvieron temperaturas más altas, produciendo liberaciones de emisiones de calor mayores en la superficie.
- En el estudio del Trafico Promedio Diario Anual se obtuvo un ESAL de diseño para un periodo de 15 años con una tasa de crecimiento para vehículos livianos del 7%, de 113280.74 ejes equivalentes de 18000 libras o 8.2 Ton.
- Mediante el análisis de las áreas afectadas del circuito vial, se determinó el índice de serviciabilidad del pavimento mismo que proporciona un valor de 1.1 entrando en la categoría de POBRE, presentada por el instituto del asfalto, llegando a la conclusión

de que en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE existe un pavimento deteriorado, el cual no brinda ni confort, ni seguridad a quienes circulan por este anillo vial.

- Para la evaluación funcional del pavimento, se realizó una caracterización de las patologías existentes en la zona de estudio, obteniendo como resultado la presencia de: piel de cocodrilo, fisura longitudinal, fisuras transversales, fisuras de bloque, baches, hundimientos, descascaramiento, a su vez estas presentan gran severidad, debido que en las fisuras ya existe presencia de material orgánico.

- La emisividad para un pavimento de asfalto en perfecto estado es de 0.967 y el pavimento existente en la zona de estudio presenta una emisividad de 0.9, demostrando que la presencia de patologías viales han afectado su estructura y por ende su comportamiento se evidencia malogrado.

- El material granular del pavimento existente, no cumple con las condiciones de base, y subbase de acuerdo a las fajas granulométricas presentadas por la normativa MTOP F001, capítulo 403 en la tabla 403-1.1 debido a que la faja obtenida en el estudio no se encuentra entre sus límites superior e inferior.

- En vista que la obtención manual de datos de temperatura del asfalto de la zona de estudio era complicado, se optó por diseñar un sistema de adquisición de datos electrónico, el cual consistía de sensores de temperatura, de humedad y una placa arduino nano, acompañado del software Excel para realizar la representación gráfica de los espectros de temperatura y humedad en función del tiempo.

- Los espectros presentados en el modelo experimental SAD son desarrollados en tiempo real, y establecen la temperatura del asfalto obtenida en la zona de estudio, al contrario de utilizar modelos de predicción, los cuales necesitan la temperatura media del aire, valor que puede presentar errores en el estudio.

- Debido a que el pavimento se encuentra sometido a esfuerzos de compresión y tracción, es necesario colocar 2 sensores como mínimo, uno que mida la temperatura producida por los esfuerzos de compresión y otro que mida la temperatura producida por los esfuerzos de tracción. En esta investigación se optó por colocar el primer sensor a 2 cm y el segundo a 4 cm desde la superficie los cuales permitieron asimilar el comportamiento térmico que presenta la muestra asfáltica ante estos esfuerzos.

- Los registros de temperatura obtenidos mediante el SAD indicaron que durante un periodo de 7 horas que va de 6:00 AM a 13:00 PM, la carpeta de rodadura tiende a sufrir un fenómeno de tensión debido al aumento de temperatura siendo la mínima 13.81 °C y la máxima 18.25 °C. Por el contrario durante un periodo de la misma duración que empieza desde 18:00 PM hasta 1:00 AM la carpeta de rodadura tiende a comprimirse debido al descenso de temperatura desde un máximo 19.25 °C hasta un mínimo de 15.81 °C, al no haber presencia de luz solar.

5.2 Recomendaciones

- Establecer una metodología de trabajo de los sistemas UAV/UAS, para identificar una altura apropiada de vuelo, y estabilidad del dron, condiciones desarrolladas de acuerdo a las condiciones geográficas del lugar.

- En el Ecuador existe la necesidad de potenciar el estudio de la energía solar (irradiancia), y crear curvas de comportamiento para todos los días del año, de esta manera establecer patrones de conducta que facilite la experimentación desarrollo e innovación de productos asfálticos con mejor desempeño.
- Considerar en el estudio del ESAL de diseño de pavimentos la presión de contacto, la presión de inflado para un obtener un análisis más cercano a la realidad.
- Realizar acondicionamientos al asfalto AC-20 de acuerdo a la localización geográfica de intervención, con la finalidad de obtener mejor desempeño del material asfáltico y de esta manera prolongar la vida útil de los pavimentos.
- Para zonas donde no exista la presencia de una estación meteorológica perteneciente al ANAMHI, se recomienda establecer métodos experimentales alternativos para obtener variaciones térmicas reales, para el estudio de temperaturas y humedades.
- Determinar un estudio térmico de zonificación a nivel local, provincial y/o regional mediante un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) para zonificaciones alejadas, mediante una calibración física de la señal, acondicionamiento del sistema, digitalización y comunicación mediante una PC, de esta manera establecer parámetros de comportamiento térmico similar a la zona de estudio.
- Colocar los sensores de manera equidistante al eje neutro de las probetas a ensayar, de esta manera se puede establecer de manera acertada el comportamiento tanto de las fibras superiores a tracción, como las inferiores a compresión en la carpeta de rodadura.

- La investigación realizada busca una mejor manera de realizar carreteras, mediante la incorporación de nuevas tecnologías, de esta manera recomendar y brindar soluciones para prolongar la vida útil de las estructuras viales.
- Para estudios más específicos de diseño y caracterización de mezclas asfálticas y control de calidad se recomienda establecer en los ensayos rangos de variación térmica y rangos de humedad, realizados en este estudio con la finalidad de evidenciar su comportamiento en sus propiedades índice y mecánicas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (1993). *Guía para diseño de estructuras de pavimentos*.
- Angstrom, A. (1924). *Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation*.
- ASTM C131. (1990). *Ensayo de Abrasion*.
- ASTM C136. (1990). *Granulometría de agregados pétreos*.
- ASTM D5. (1992). *Ensayo de Penetración*.
- Bergel, J. P. (1990). Diseño estructural del pavimento. *Revista Ingeniería de Construcción*, 3-5.
- Cardenas, J. A., & Fonseca, L. (2009). *Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura*. *Revista EIA*, (12), 125-137.
- Cordo, O. V. (2006). *Diseño de Pavimentos Aashto 93*. La paz: Escuela de Caminos de Monatáña.
- Cossi, P. (2012). Diseño de pavimentos por metodo Aashto 93.
- Departament d'Enginyeria del Terreny. (2012). *Introduccion de posicionamiento GPS*. Obtenido de <http://www.creaf.uab.es/master/intranet/MaterialsProfessors/GeodesiaSistPosicionament/JosepGili/teoriaGNSS-GPS-editada.1a.slide.pdf>
- Departamento de Geotécnia. (2002). *Diseño de Pavimentos Flexibles Capitulo 5*. Quito.
- ECYT-AR. (24 de Noviembre de 2017). *La enciclopedia de ciencias y tecnologías en Argentina*. Obtenido de https://cyt-ar.com.ar/cyt-ar/index.php/Irradiación_solar
- Espinoza, L. E. (15 de Enero de 2018). Analisis de alternativas en el diseño de pavimentos flexibles y rigidos por el metodo AASHTO 93. Cuenca, Ecuador. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30348>
- FLIR. (2011). *Guía de termografía para mantenimiento predictivo*. Obtenido de <http://www.mra.pt/repositorio/6769/pdf/3505/2/guia-de-termografia-para-mantenimiento-predictivo.pdf>
- FLIR. (5 de Agosto de 2017). *Soluciones Termográficas Avanzadas Soluciones Térmicas para investigadores de I+D*. Obtenido de <http://www.flir.es/cs/display/?id=41491>

- Fonseca, A. M. (2010). *Ingeniería de Pavimentos*. Bogotá: Universidad católica de Colombia.
- Gueymard, C. (2004). *The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models*, Solar Energy.
- INEN 857. (2000). *Gravedad específica de agregados gruesos*.
- INEN 860. (2002). *Ensayo de Abrasión "Máquina de los ángeles"*.
- Ingeniería, U. A. (20 de Mayo de 2017). *Red y Seguridad*. Obtenido de <http://redyseguridad.fi-p.unam.mx/proyectos/biometria/basesteoricas/reconocimiento.html>
- Instituto Mexicano de Transporte. (2005). Análisis comparativo de los métodos Marshall y super pave para compactación de mezclas asfálticas. En P. Garnica Anguas, H. Delgado Alamilla, & C. Sandoval Sandoval. Sanfandila.
- INVIAS. (1997). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías de bajo volumen de tránsito*. Bogotá.
- INVIAS, M. d. (2006). *Manual para la inspección visual de pavimento flexible*. Bogotá.
- Madrid, F. d. (2015). *Los Drones y su aplicación en la Ingeniería Civil*. Madrid.
- Mejía, J. B. (2014). *Calibración de Cámara Termográfica Fluke TI-32*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Meléndez, A. S. (2006). *Efectos de la Temperatura de compactación en la resistencia al flujo plástico*. El Salvador: Ministerio de Obras Públicas del Salvador.
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte. (2006). *MTOP*. Quito.
- MOP F-001, M. d. (2002). *MOP F-001*. Esmeraldas.
- Morea, F. (2011). *Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas*. La Plata, Buenos Aires.
- MTOP F001. (2002). *Ministerio de Transporte y Obras Públicas*. Quito.
- MTOP, M. d. (2012). *NEVI-12 Volumen 2A*. Quito.
- MTOP, M. d. (2012). *NEVI-12 Volumen 6*. Quito.
- NTL 346/90, Norma. (s.f.). *Resistencia a compresión diametral de mezclas bituminosas*.
- Patillo, J. (2000). *Diseño estructural de pavimento flexible*. Chile.
- Tecnología FLIR. (2017). *Técnicas de medida termográfica*.

UMSS, U. M. (2012). *Manual Completo de Diseño de Pavimentos*. Colombia: Facultad de Ciencia y Tecnología.

Universidad de Valencia. (2016). *Sistemas industriales distribuidos*. Obtenido de https://www.uv.es/rosado/courses/sid/Capitulo2_rev0.pdf

Weather Spark. (Marzo de 2018). *Weather Spark*. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/20029/Clima-promedio-en-Sangolquí-Ecuador-durante-todo-el-año>

World Meteorological Organization. (1981). *Meteorological aspects of the utilization of solar radiation as an energy source*. Geneva, Switzerland.

Zuñiga, R. (Julio de 2015). *Laboratorio Nacional de Vialidad*. Obtenido de <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Mezclas%20Asfálticas.pdf>