

“UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN DE LAS EMISIONES DE
POLVO EN VÍAS NO PAVIMENTADAS APLICADA A LA CIUDAD
DE TARIJA”**

Elaborado por:

ORTEGA OROPEZA HECTOR ARIEL

Proyecto presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE II/2025

TARIJA – BOLIVIA

“UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN DE LAS EMISIONES DE
POLVO EN VÍAS NO PAVIMENTADAS APLICADA A LA CIUDAD
DE TARIJA”**

Elaborado por:

ORTEGA OROPEZA HECTOR ARIEL

SEMESTRE II/2025

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA:

A Dios, por ser mi guía en todo momento, por darme la fuerza para continuar cuando el camino se volvió difícil y por acompañarme con Su amor y sabiduría en cada paso de este proceso.

A mi padre Hector Ortega Berrios (†), quien partió antes de ver culminado este sueño, pero cuyo ejemplo, esfuerzo y amor permanecen vivos en mi corazón. Su recuerdo me impulsa a seguir adelante y me inspira a alcanzar cada meta con la misma fortaleza y determinación que siempre demostró en vida.

A mi madre María Elena Oropeza Avalos, por su amor incondicional, su paciencia infinita y por ser mi sostén en los momentos más difíciles. Gracias por enseñarme con tu ejemplo el valor del trabajo, la fe y la perseverancia.

A ambos, y a Dios que siempre nos une, dedico este logro con todo mi amor, gratitud y esperanza, porque cada página de este trabajo lleva parte de su sacrificio, su enseñanza y su bendición.

INDICE GENERAL

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Justificación.....	2
1.3.	Planteamiento Del Problema.....	3
1.3.1.	Situación Problémica	3
1.3.2.	Problema	4
1.3.3.	Relevancia Y Factibilidad Del Problema.....	5
1.4.	Objetivos	5
1.4.1.	Objetivo General	5
1.4.2.	Objetivos Específicos	5
1.5.	Hipótesis.....	6
1.6.	Operacionalización De Las Variables.....	6
1.6.1.	Variables Independientes.....	6
1.6.2.	Variables Dependientes	7
1.7.	Identificación Del Tipo De Investigación.....	7
1.7.1.	Selección De Las Técnicas De Muestreo.....	8
1.8.	Métodos Y Técnicas Empleadas	9
1.8.1.	Métodos.....	9
1.8.2.	Técnicas	9
1.8.3.	Tratamiento Estadístico.....	10
1.9.	Alcance De La Investigación	12

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.	MARCO TEÓRICO.....	14
2.1.	Definición Y Características Generales	14
2.2.	Importancia Social Y Económica De Las Vías No Pavimentadas	14
2.3.	Condiciones Constructivas Y Degradación Superficial.....	15
2.4.	Problemática Ambiental: Generación De Polvo	15
2.5.	Impactos En La Salud Y En La Vida Cotidiana.....	16
2.6.	Contaminación Atmosférica Y Material Particulado	16
2.6.1.	Concepto De Contaminación Atmosférica.....	16
2.6.2.	Contaminantes Criterio	17
2.6.3.	Material Particulado (PM ₁₀ Y PM _{2,5}): Definición Y Origen	17
2.6.4.	Efectos En La Salud Humana.....	18
2.6.5.	Efectos En El Ambiente Y La Economía	18
2.6.6.	Situación En Bolivia Y En Tarija.....	19
2.7.	Normativas Internacionales Y Nacionales Sobre Calidad Del Aire.....	19
2.7.1.	Estándares Internacionales: OMS, EPA Y La Unión Europea	19
2.7.2.	Normativa Latinoamericana Y Comparativa.....	20
2.7.3.	Normativa Boliviana: Ley 1333 Y Reglamentos Específicos	20
2.8.	Factores Que Influyen En Las Emisiones De Polvo.....	21
2.8.1.	Tráfico Vehicular	21
2.8.2.	Características Del Suelo	22
2.8.3.	Condiciones Climáticas	22

2.9.	Métodos De Medición De Emisiones De Polvo.....	22
2.9.1.	Métodos Directos De Medición De Emisiones De Polvo.....	23
2.9.1.1.	Muestreo Gravimétrico.....	23
2.9.1.2.	Monitoreo Portátil Con Minivol TAS.....	23
2.9.1.3.	Monitoreo Continuo Con Sensores Automáticos.....	27
2.9.2.	Métodos Indirectos De Medición De Emisiones De Polvo.	28
2.10.	Modelos De Estimación De Emisiones De Polvo	29
2.10.1.	Clasificación De Los Modelos De Estimación De Emisiones De Polvo..	29
2.11.	Modelos De Estimación De Emisiones De Polvo En Vías No Pavimentadas	30
2.11.1.	Evolución De Los Modelos De Emisión	30
2.11.2.	El Modelo AP-42 De La EPA.....	30
2.11.3.	Variables Principales Del AP-42	31
2.11.4.	Ventajas Del Modelo AP-42.....	32
2.11.5.	Limitaciones Del AP-42 Y Necesidad De Validación Local.....	32
2.12.	Métodos De Medición Y Validación	33
2.12.1.	Técnicas De Muestreo Directo De Partículas	33
2.12.2.	Métodos En Tiempo Real.....	34
2.12.3.	Estrategias De Validación De Modelos.....	34
2.13.	Antecedentes Internacionales Y Nacionales	35
2.13.1.	Antecedentes Internacionales	35
2.13.2.	Antecedentes Nacionales En Bolivia.....	36
2.14.	Ensayos De Caracterización De Suelos	37

2.14.1.	Importancia De La Caracterización De Suelos En Vías No Pavimentadas.....	37
2.14.2.	Granulometría (AASHTO T88).....	37
2.14.3.	Contenido De Humedad (AASHTO T265).....	38
2.14.4.	Límites De Atterberg	39
2.14.4.1.	Límite Líquido (AASHTO T89)	40
2.14.4.2.	Límite Plástico (AASHTO T90)	40
2.14.4.3.	Índice De Plasticidad	40
2.14.5.	Clasificación De Suelos	41
2.14.5.1.	Sistema Unificado De Clasificación De Suelos SUCS	41
2.15.	Aforo Vehicular.....	43
2.15.1.	Concepto E Importancia	43
2.15.2.	Clasificación Vehicular Y Estimación Del Peso Promedio (W).....	44
2.15.3.	Medición De Velocidad Vehicular Con Radar Y Percentil 85.....	44
2.16.	Formas De Mitigación De Emisiones En Vías No Pavimentadas.....	45
2.16.1.	Importancia De La Mitigación Del Polvo En Áreas Urbanas.....	45
2.16.2.	Riego Periódico Con Agua.....	45
2.16.3.	Supresores Químicos De Polvo.....	46
2.16.4.	Mejoras Geométricas Y De Mantenimiento.....	47
2.16.5.	Pavimentación Como Solución Definitiva.....	47
2.16.6.	Medidas Complementarias.....	48
2.17.	Fundamentos Estadísticos Aplicados A La Validación Del Modelo	48
2.17.1.	Conceptos Básicos De Estadística Descriptiva	48
2.17.2.	Regresión Lineal Simple.....	49

2.17.3.	Coeficiente De Determinación (R^2).....	50
2.17.4.	Error Cuadrático Medio (RMSE)	50
2.17.5.	Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE)	51
2.18.	Aplicaciones En Modelos De Calidad Del Aire.....	51

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

III.	METODOLOGÍA.....	52
3.1.	Área De Estudio	52
3.1.1.	Ubicación Geográfica De La Provincia Cercado	52
3.1.2.	Características Climáticas	53
3.1.3.	Condiciones Ambientales Y Calidad Del Aire	53
3.1.4.	Selección De Los Barrios De Estudio.....	54
3.2.	Diseño Del Muestreo	56
3.2.1.	Tamaño Y Distribución De La Muestra	56
3.2.2.	Definición De Tramos De Muestreo.....	57
3.2.3.	Procedimiento De Recolección Y Transporte.	57
3.3.	Caracterización De Suelos	59
3.3.1.	Contenido De Humedad.....	59
3.3.2.	Análisis Granulométrico Por Tamizado (Método Del Lavado)	62
3.3.3.	Límites De Atterberg	64
3.3.3.1.	Limite Liquido	64
3.3.3.2.	Limite Plástico	67
3.3.4.	Clasificación De Suelo.....	68

3.4.	Aforo Vehicular, Velocidades Y Obtención De Variables De Operación.....	70
3.4.1.	Importancia Del Aforo Vehicular	70
3.4.2.	Variables De Operación Y Su Influencia En Las Emisiones.....	71
3.4.3.	Aforo Vehicular Clasificado (V12h Y VPD).....	71
3.4.4.	Medición De Velocidad De Operación (V85)	74
3.4.5.	Composición Vehicular Y Peso Promedio (W)	76
3.4.6.	Cálculo De Emisiones Con El Modelo AP-42	79
3.5.	Calibración Del Modelo AP-42.....	81
3.5.1.	Descripción Del Equipo Minivol Tas	81
3.5.2.	Especificaciones técnicas del MiniVol TAS.....	83
3.5.3.	Procedimiento De Medición De PM ₁₀	84
3.5.4.	Emisiones Medidas Por El Laboratorio ENVIROLAB (Laboratorio Y Monitoreo).....	87

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y RESULTADOS

IV.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	90
4.1.	Análisis Y Resultados	90
4.2.	Resultados De La Caracterización Física Del Camino.....	91
4.2.1.	Análisis Granulométrico Y Clasificación Del Suelo	91
4.3.	Resultados Del Aforo Vehicular	93
4.3.1.	Volumen De Tránsito (VPD).....	93
4.3.2.	Composición Vehicular	95

4.3.3.	Clasificación De Vías Según El Nivel De Trafico	96
4.4.	Resultados De Las Velocidades De Operación	98
4.5.	Peso Promedio Vehicular Y Composición De Flota	100
4.6.	Resultados De Emisiones Especificas (E)	102
4.7.	Emisiones Diarias Totales.....	103
4.8.	Resultados De Las Mediciones Con El MiniVol TAS	105
4.9.	Calibración Y Validación Del Modelo	106
4.9.1.	Calibración Del Modelo.....	106
4.9.2.	Validación Del Modelo	109
4.9.3.	Evaluación Técnica Y Aplicabilidad Local.....	110
4.9.4.	Aplicación Del Modelo Calibrado.....	111
4.10.	Análisis Comparativo General	113
4.10.1.	Relación Entre Variables Principales.....	113
4.10.2.	Relación Espacial De Emisiones Y Concentraciones	114
4.10.3.	Representatividad Del Modelo Calibrado.....	114
4.11.	Discusión De Resultados	115
4.11.1.	Evaluación Del Desempeño Del Modelo Calibrado.....	115
4.11.2.	Aplicabilidad Del Modelo Calibrado.....	116

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
5.1.	Conclusiones	117
5.2.	Recomendaciones	118

CAPITULO VI

BIBLIOGRAFIA

VI. BIBLIOGRAFÍA

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.	Variables Independientes	7
Tabla 1.2.	Variables Dependientes	7
Tabla 2.1.	Clasificación de suelos según cada tamaño de partículas	38
Tabla 2.2.	Clasificación de suelos según índice de plasticidad	41
Tabla 2.3.	Símbolos utilizados en la clasificación SUCS.....	42
Tabla 3.1.	Ubicación de puntos.....	55
Tabla 3.2.	Contenido de humedad suelo.....	60
Tabla 3.3.	Valores % pasa tamiz N°200.....	63
Tabla 3.4.	Valores del LL con el Copa Casagrande	66
Tabla 3.5.	Valores de LP	67
Tabla 3.6.	Resumen de Resultados de la Clasificación del suelo	69
Tabla 3.7.	Resumen Volumen Diario Promedio	73
Tabla 3.8.	Resumen V85	75
Tabla 3.9.	Pesos Medio.....	77
Tabla 3.10.	Pesos Promedios	78
Tabla 3.11.	Emisiones estimadas por el modelo AP-42.....	79
Tabla 3.12.	Emisiones diarias estimadas	80
Tabla 3.13.	Informe ENVIROLAB.....	87
Tabla 4.1.	Composición Vehicular en los Barrios	95

Tabla 4.2.	Clasificación de vías según nivel de tráfico	96
Tabla 4.3.	Clasificación de vías según nivel de tráfico por Barrios.....	97
Tabla 4.4.	Datos experimentales y estimaciones utilizados para la calibración del modelo AP-42	107
Tabla 4.5.	Resultados de las concentraciones estimadas	108
Tabla 4.6.	Indicadores estadísticos de validación del modelo calibrado.....	110
Tabla 4.7.	concentraciones estimadas (Cest) de PM ₁₀	111
Tabla 4.8.	Coeficientes de correlación entre variables de tráfico, suelo y concentración de PM ₁₀	113

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.	Equipo MiniVol TAS.....	25
Figura 2.2.	Muestreador MiniVol TAS.....	27
Figura 2.3.	Límites de consistencia de suelos de grano fino.....	39
Figura 2.4.	Carta de plasticidad.....	43
Figura 3.1.	Mapa de Tarija.....	52
Figura 3.2.	Ubicación De Los Tramos En Estudio.....	54
Figura 3.3.	Tramo de Muestreo	57
Figura 3.4.	Proceso de Extracción de suelo fino	58
Figura 3.5.	Proceso de traslado	58
Figura 3.6.	Muestra de suelo para contenido de humedad.....	59
Figura 3.7.	Proceso del lavado y tamizado de suelo.....	63
Figura 3.8.	Determinación de limite liquido Equipo Casagrande	65
Figura 3.9.	Determinación Limite Plástico	67

Figura 3.10. Aforo vehicular.....	72
Figura 3.11. Aforo de velocidad con pistola radar	75
Figura 3.12. Filtro de Fibra.....	82
Figura 3.13. Instalación del MiniVol Tas	85
Figura 3.14. MiniVol Tas utilizado	86
Figura 4.1. (% que pasa el tamiz N.º 200) por barrio	91
Figura 4.2. Correlación s (%) vs Cmed(ug/m3)	92
Figura 4.3. Resumen del VPD actualizado por tramo	93
Figura 4.4. Correlación entre VPD vs Cmed (ug/m3)	94
Figura 4.5. Distribución de velocidades V_{85} por tramo	98
Figura 4.6. Relación entre velocidad V_{85} y Cmed (ug/m3).....	99
Figura 4.7. Peso promedio vehicular ponderado (Wprom) por tramo.....	100
Figura 4.8. Relación entre Wprom (t) y Cmed (ug/m3)	101
Figura 4.9. Emisiones específicas E (g/VKT) por tramo.....	102
Figura 4.10. Emisiones diarias E (g/día) por tramo.....	104
Figura 4.11. Concentraciones de PM_{10} medidas con MiniVol TAS ($\mu g/m^3$).....	105
Figura 4.12. Gráfico de dispersión entre concentraciones medidas y estimadas	109

ANEXOS

Anexo I Contenido De Humedad

Anexo II Granulometría

Anexo III Limites de Atterberg