



Universidad  
Nacional  
de Loja

**Universidad Nacional de Loja**

**Facultad Agropecuaria y Recursos Naturales Renovables**

**Maestría en Biodiversidad y Cambio Climático**

**Vulnerabilidad al cambio climático de la Red Vial Estatal E-35,  
tramo Loja – Catamayo, en la provincia de Loja**

Trabajo de Titulación previo a la  
obtención del título de Magister en  
Biodiversidad y Cambio Climático

**AUTOR:**

César Aurelio Piñeda Armijos

**DIRECTOR:**

Ing. Carlos Guillermo Chuncho Morocho. Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2024

## Certificación

Loja, 30 de agosto de 2023

Ing. Carlos Guillermo Chuncho Morocho Mg. Sc.  
**DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **CERTIFICO:**

Que he revisado y orientado todo el proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Vulnerabilidad al cambio climático de la Red Vial Estatal, E-35 tramo Loja – Catamayo, en la provincia de Loja**, previo a la obtención del título de **Magíster en Biodiversidad y Cambio Climático**, de la autoría del estudiante **César Aurelio Piñeda Armijos**, con **cédula de identidad Nro. 1103815849**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



Ing. Carlos Guillermo Chuncho Morocho Mg. Sc.  
**DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

## Autoría

Yo, **César Aurelio Piñeda Armijos**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales por el contenido de esta. Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi Trabajo de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

**Firma:**



**Autor:** César Aurelio Piñeda Armijos

**Cédula de identidad:** 1103815849

**Fecha:** 25/03/2024.

**Correo electrónico:** César.pineda@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0998032738

## **Carta de Autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación**

Yo, **César Aurelio Piñeda Armijos**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado **Vulnerabilidad al cambio climático de la Red Vial Estatal, E-35 tramo Loja – Catamayo, en la provincia de Loja**, como requisito para optar por el título de **Magíster en Biodiversidad Cambio Climático**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Digital Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, suscribo, en la ciudad de Loja, a los doce días del mes de marzo, de dos mil veinticuatro.

**Firma:**



Firmado electrónicamente por:  
**CESAR AURELIO  
PINEDA ARMIJOS**

**Autor:** César Aurelio Piñeda Armijos

**Cédula:** 1103815849

**Dirección:** Cabo Rommel Vásquez y  
Soldado Héctor Pilco, Loja-Ecuador

**Correo electrónico:**

César.pineda@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0998032738

### **DATOS COMPLEMENTARIOS:**

**Director de Trabajo de Titulación:** Ing. Carlos Guillermo Chuncho Morocho. Mg. Sc

## **Dedicatoria**

Queridos, Verónica, Pablo, Alejandra y familia:

Con todo mi amor y agradecimiento, dedico esta tesis a ustedes. Su amor, apoyo y paciencia han sido la fuerza motriz detrás de mi éxito en este proyecto.

Verónica, gracias por ser mi compañera de vida y por siempre estar a mi lado. Tu amor, dedicación y paciencia han sido un pilar fundamental en este proceso.

Pablo y Alejandra, mis hijos amados, gracias por ser mi fuente de inspiración y motivación en todo momento. Su alegría y entusiasmo me impulsaron a seguir adelante en los momentos difíciles.

A mi familia, gracias por su incondicional apoyo y por creer en mí y en mis sueños. Su amor y aliento han sido un impulso constante en mi vida.

Espero que este logro sea un motivo de orgullo para todos ustedes y que esta tesis pueda ser una contribución valiosa en el ámbito de la adaptación al cambio climático en la vía Loja-Catamayo.

Con todo mi amor y gratitud,

***César Aurelio Piñeda Armijos***

## **Agradecimiento**

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi esposa, Verónica Gonzales, por su apoyo incondicional y su paciencia durante todo el proceso de investigación y redacción de mi tesis. Su amor y dedicación han sido fundamentales para que pueda alcanzar este logro.

También quiero agradecer a mis hijos, Pablo y Alejandra, por ser mi motivación y mi inspiración para seguir adelante en momentos difíciles. Su cariño y comprensión han sido una gran ayuda en todo momento.

A mi familia, por su constante apoyo y aliento en todo momento, y por creer en mí y en mis capacidades.

Agradezco especialmente a mi director de tesis, por su orientación y su guía experta en todo el proceso, y por su apoyo en la presentación y defensa de mi trabajo.

También quiero agradecer a mis asesores, por su valiosa contribución en la investigación y por sus consejos y recomendaciones que han sido de gran ayuda para el éxito de mi tesis.

Finalmente, agradezco a todos los que de alguna manera contribuyeron a este trabajo, y espero que los resultados de esta investigación puedan ser de utilidad para futuros estudios y para la toma de decisiones en el ámbito de la adaptación al cambio climático en la vía Loja-Catamayo.

*César Aurelio Piñeda Armijos*

## Índice de contenido

<b>Portada</b>	<b>i</b>
<b>Certificación</b>	<b>ii</b>
<b>Autoría</b>	<b>iii</b>
<b>Carta de Autorización</b>	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimiento</b>	<b>vi</b>
<b>1. Título</b>	<b>16</b>
<b>2. Resumen</b>	<b>17</b>
2.1 Abstract	18
<b>3. Introducción</b>	<b>19</b>
<b>4. Marco teórico</b>	<b>22</b>
4.1 Cambio climático	22
4.1.1 Definición y conceptos clave relacionados con el cambio climático.	22
4.2 Tendencias climáticas históricas y proyecciones futuras en la región.	23
4.3 Efectos del cambio climático en la región, incluyendo eventos extremos y variabilidad climática.	25
4.4 Contribución humana al cambio climático.	25
4.5 Vulnerabilidad, riesgo y su aplicación en el contexto del cambio climático.	26
4.6 Metodologías de evaluación de la vulnerabilidad en el contexto de la infraestructura vial.	27
4.6.1 Análisis de vulnerabilidad.	28
4.6.2 Evaluación de riesgo	30
4.6.3 Análisis de impacto	30
4.7 Factores que influyen en la vulnerabilidad.	31
4.8 Infraestructura vial	32

4.9	Impactos .....	32
4.10	La gestión de los impactos del cambio climático en la infraestructura vial .....	33
4.11	Adaptación.....	33
4.11.1	Principios de planificación de la adaptación.....	34
4.12	Gestión del riesgo .....	35
4.13	Participación ciudadana:.....	35
4.14	Financiamiento. ....	36
4.15	Estudios recientes sobre vulnerabilidad de la infraestructura vial al cambio climático	36
<b>5.</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>38</b>
5.1	Área de estudio.....	38
5.2	Método de estudio .....	40
5.3	Tipo de investigación .....	40
5.4	Diseño de investigación .....	40
5.5	Marco metodológico .....	42
5.6	Determinar las condiciones climáticas actuales de precipitación y temperatura sobre la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja - Catamayo.....	43
5.6.1	Base de datos de clima.....	43
5.6.2	Tasas de retorno .....	45
5.6.3	Cambio climático .....	46
5.7	Evaluar la vulnerabilidad actual y futura, período 1981 - 2075 de la Red Vial Estatal RVE E - 35, tramo Loja - Catamayo, en un contexto de cambio climático para una comprensión adecuada en la gestión y desarrollo infraestructura vial sostenible. ....	48
5.7.1	Metodología para evaluar la vulnerabilidad .....	48
5.7.2	Evaluación de la exposición.....	51
5.7.3	Evaluación de la sensibilidad.....	52
5.7.4	Capacidad adaptativa de las carreteras .....	54



5.8	Elaboración de la propuesta de adaptación al cambio climático para la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja - Catamayo, a través de la Subsecretaria Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. ....	55
<b>6.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>58</b>
6.1	Condiciones climáticas actuales de precipitación y temperatura sobre la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja -- Catamayo. ....	58
6.1.1	Valores atípicos.....	58
6.1.2	Temperatura media mensual multianual.....	64
6.1.3	Temperatura media máxima multianual .....	65
6.1.4	Temperatura media mínima multianual .....	68
6.1.5	Imputación de los datos de precipitación y temperatura para el estudio .....	70
6.1.6	Evaluación estadística de datos que generaron información a nivel mensual	75
6.1.7	Precipitación multianual .....	76
6.1.8	Análisis de valores extremos máximos mensuales de lluvia .....	88
6.1.9	Generación de mapas por interpolación de los datos de precipitación, temperatura media, mínima y máxima del corredor de la vía Loja - Catamayo.....	91
6.1.10	Cambio climático .....	103
6.1.11	Análisis de variables climáticas, precipitación, temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima. ....	105
6.2	Vulnerabilidad actual y futura del tramo Loja - Catamayo de la RVE 35 a los efectos del cambio climático.....	118
6.2.1	Caracterización del Tramo Loja - Catamayo .....	118
6.2.2	Amenazas climáticas al tramo Loja Catamayo.....	118
6.2.3	Estado actual del tramo Loja Catamayo .....	119
6.3	Propuesta de adaptación al cambio climático para la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja - Catamayo, a través de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.....	123
6.3.1.	Encuesta semiestructurada a los funcionarios de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador .....	123

6.3.2	Análisis de componentes principales (ACP) de las respuestas de la encuesta sobre la vulnerabilidad de la carretera Loja-Catamayo al cambio climático .....	128
6.3.3	Propuesta de la Subsecretaría Zonal 7 para la adaptación y mitigación de la vulnerabilidad climática en la vía Loja-Catamayo .....	131
<b>7.</b>	<b>Discusión.....</b>	<b>140</b>
7.1	Condiciones climáticas actuales de precipitación y temperatura sobre la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja – Catamayo .....	140
7.2	Vulnerabilidad actual y futura, periodo 1981-2075, de la Red Vial Estatal RVE E - 35, tramo Loja – Catamayo, en un contexto de cambio climático para una comprensión adecuada en la gestión y desarrollo infraestructura vial sostenible .....	142
7.3	Propuesta de adaptación al cambio climático para la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja - Catamayo, a través de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.....	146
<b>8.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>152</b>
<b>9.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>153</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>155</b>
<b>11.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>170</b>

## Índice de tablas:

Tabla 1. Componentes del diseño de investigación .....	41
Tabla 2. Indicadores para evaluar exposición. ....	51
Tabla 3. Indicadores utilizados para evaluar la sensibilidad. ....	52
Tabla 4. Indicadores utilizados para evaluar la capacidad de adaptación de las carreteras .....	54
Tabla 5. Prueba de Grubbs para las 19 estaciones que poseen datos de precipitación media mensual multianual .....	63
Tabla 6. Prueba de Grubbs para las 4 estaciones que poseen datos de temperatura media multianual.....	64
Tabla 7. Prueba de Grubbs para las 5 estaciones que poseen datos de temperatura media multianual máxima.....	68
Tabla 8. Prueba de Grubbs para las 3 estaciones que poseen datos de temperatura media mínima multianual.....	69
Tabla 9. Error cuadrático de los datos imputados de las 19 estaciones para la precipitación mensual multianual. ....	70
Tabla 10. Resultado del análisis de homogeneización de datos de precipitación mensual multianual para 19 estaciones en la provincia de Loja.....	71
Tabla 11. Error cuadrático de los datos imputados de las 4 estaciones para la temperatura media mensual multianual. ....	72
Tabla 12. Resultado del análisis de homogeneización de datos de temperatura media mensual multianual para 4 estaciones en la provincia de Loja.....	72
Tabla 13. Error cuadrático de los datos imputados de las 5 estaciones para la temperatura media máxima mensual multianual.....	73
Tabla 14. Resultado del análisis de homogeneización de datos de temperatura media mensual máxima multianual para 5 estaciones en la provincia de Loja.....	74
Tabla 15. Error cuadrático de los datos imputados de las 3 estaciones para la temperatura media mínima mensual multianual. ....	74
Tabla 16. Resultado del análisis de homogeneización de datos de temperatura media mensual máxima multianual para 3 estaciones en la provincia de Loja.....	75
Tabla 17. Precipitación media mensual multianual de 1981 al 2010 de 19 estaciones en la provincia de Loja.....	77
Tabla 18. Principales estadísticos descriptivos para cada estación para precipitación. ....	79

Tabla 19. Datos de temperatura media mensual máxima para las estaciones La Argelia - Loja, Saraguro, Malacatos y Cariamanga.....	80
Tabla 20. Resumen de los principales estadísticos descriptivos para cada estación de temperatura media mensual máxima multianual.....	82
Tabla 21. Temperaturas medias mensuales multianuales 1981 al 2010. ....	83
Tabla 22. Datos estadísticos de la Temperatura media mensual multianual para el periodo 1981 al 2010.....	84
Tabla 23. Temperatura media mínima multianual de 1981 al 2010.....	86
Tabla 24. Temperatura mínima mensual multianual de 1981 al 2010. ....	87
Tabla 25. Valores extremos máximos mensuales de lluvia y pruebas estadísticas.....	88
Tabla 26. Tasas de retorno para 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años .....	89
Tabla 27. Tasas de retorno del área de influencia directa de la vía Loja Catamayo .....	94
Tabla 28. Modelos Climáticos Globales .....	103
Tabla 29. Validación de Modelos Climáticos Globales para Precipitación. ....	103
Tabla 30. Validación de Modelos Climáticos Globales para Temperatura.....	104
Tabla 31. Resumen de la longitud de los segmentos de la vía Loja-Catamayo y sus respectivas categorías de vulnerabilidad.....	121
Tabla 32. Percepciones de los Técnicos del MTOP sobre la Vulnerabilidad y la Necesidad de Adaptación de la Vía Loja-Catamayo ante el Cambio Climático .....	124
Tabla 33. Marco lógico para la propuesta de adaptación y mitigación de la vulnerabilidad climática en la vía Loja-Catamayo por la Subsecretaría Zonal 7.....	133

### **Índice de figuras:**

Figura 1. Relación entre los Componentes de la Vulnerabilidad. (Mendoza-Sánchez et al., 2019).....	27
Figura 2. Esquema para la determinación de impactos del cambio climático en la infraestructura carretera en México. (Mendoza-Sánchez et al., 2019).....	31
Figura 3. Ubicación de la Zona 7 en el territorio ecuatoriano y su red vial regional.....	38
Figura 4. Red Vial Estatal, E-35 tramo Loja – Catamayo, en la provincia de Loja.....	39
Figura 5. Marco metodológico para la vulnerabilidad de infraestructura vial. ....	43
Figura 6. Flujograma del procedimiento metodológico del primer objetivo. ....	47
Figura 7. Flujograma del proceso metodológico para establecer la Vulnerabilidad al cambio climático de la Red Vial Estatal, E-35 tramo Loja – Catamayo, en la provincia de Loja.....	50

Figura 8. Proceso metodológico utilizado para el desarrollo de la encuesta semiestructurada. .....	57
Figura 9. Ubicación de Estaciones Meteorológicas seleccionadas para análisis de precipitación y temperaturas (media, máxima y mínima) en la Provincia de Loja, 1981-2010. ....	59
Figura 10. Distribución de la precipitación mensual por estación y visualización de valores atípicos. ....	60
Figura 11. Distribución de Precipitación Mensual en las 19 estaciones. ....	61
Figura 12. Distribución de la temperatura media mensual plurianual por estación y visualización de valores atípicos. ....	65
Figura 13. Distribución de la temperatura media mensual plurianual por estación y visualización de valores atípicos. ....	67
Figura 14. Distribución de la temperatura mínima mensual plurianual por estaciones y visualización de valores atípicos. ....	69
Figura 15. Precipitación media mensual de 19 estaciones entre 1981-2010. ....	78
Figura 16. Temperatura media máxima multianual para el periodo 1981 al 2010 ....	81
Figura 17. Tendencias en la temperatura máxima anual durante del periodo 1981 a 2010. ....	82
Figura 18. Las temperaturas medias mensuales multianual para el periodo 1981 al 2010. ....	84
Figura 19. Tendencias de las temperaturas medias mensuales multianual para el periodo 1981 al 2010. ....	85
Figura 20. Temperatura mínima mensual multianual de 1981 al 2010. ....	86
Figura 21. Tendencias de temperatura mínima multianual del periodo 1981 al 2010. ....	87
Figura 22. Cambio porcentual de las precipitaciones máximas con periodos de retorno largos. .....	91
Figura 23. Precipitaciones medias multianuales del área de Influencia Directa para el periodo de 1981 al 2010. ....	93
Figura 24. Distribución mensual de la precipitación de la vía Loja-Catamayo. ....	94
Figura 25. Tasas de Retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años para el área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo. ....	95
Figura 26. Diagrama de la temperatura media mensual multianual del área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo período 1981 al 2010. ....	97
Figura 27. Temperatura media mensual multianual en el área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo. ....	98
Figura 28. Diagrama de la temperatura media máxima mensual multianual del área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo, período 1981 al 2010. ....	99

Figura 29. Temperatura media máxima mensual multianual del área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo, período 1981 al 2010. ....	100
Figura 30. Diagrama de la temperatura media mínima mensual multianual del área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo, período 1981 al 2010. ....	101
Figura 31. Temperatura media mínima mensual multianual del área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo, periodo 1981 al 2010. ....	102
Figura 32. Diagrama de Taylor modelo BCC-CSM2-MR para precipitación. ....	104
Figura 33. Diagrama de Taylor del modelo FGOALS-g3 para precipitación. ....	104
Figura 34. Diagrama de Taylor del modelo TaiESM1 para precipitación. ....	104
Figura 35. Diagrama de Taylor modelo BCC-CSM2-MR para temperatura media. ....	105
Figura 36. Diagrama de Taylor del modelo FGOALS-g3 para temperatura media. ....	105
Figura 37. Diagrama de Taylor del modelo TaiESM1 para temperatura media. ....	105
Figura 38. Precipitación promedio mensual y porcentaje de cambios para el histórico 1981 al 2010, escenarios SSP 370 Y SSP 585, periodos 2015 al 2045 y 2046 al 2075 del área de influencia directa de la vía Loja – Catamayo. ....	107
Figura 39. Mapas de proyecciones de precipitación para los periodos y escenarios del histórico y proyectado para la vía Loja-Catamayo. ....	108
Figura 40. Mapas <i>Rasters</i> de variación porcentual de precipitación para la Red Vial E-35 (Loja – Catamayo) bajo escenarios de cambio climático SSP 370 y SSP 585 en periodos de retorno de 2 a 100 años. ....	110
Figura 41. Diagrama de la precipitación media multianual del histórico 1981 al 2010 y, de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075. ....	111
Figura 42. Precipitación anual del histórico 1981 al 2010 y de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075 para el área de influencia directa (AID) de la vía Loja-Catamayo. ....	111
Figura 43. Porcentaje de cambios de la precipitación anual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075. ....	112
Figura 44. Diagrama de la temperatura media máxima multianual del histórico 1981 al 2010 y de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075. ..	113
Figura 45. Temperatura media máxima multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075. ....	114
Figura 46. Porcentaje de cambios de la temperatura media máxima multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075. ....	114

Figura 47. Diagrama de la temperatura media multianual del histórico 1981 al 2010 y de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.....	115
Figura 48. Temperatura media mínima multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.....	115
Figura 49. Porcentaje de cambios de la temperatura media multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075. ....	116
Figura 50. Diagrama de la Temperatura media mínima multianual del histórico 1981 al 2010 y de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075. ..	116
Figura 51. Temperatura media mínima multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.....	117
Figura 52. Porcentaje de cambios de la temperatura media mínima multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.....	117
Figura 53. Proyecciones de Vulnerabilidad en el corredor de la vía Loja - Catamayo: Comparación entre SSP 370 y SSP 585 para los años 2015, 2045 y 2075. ....	121
Figura 54. Longitudes de los segmentos por escenario y vulnerabilidad.....	122
Figura 55. Nivel de percepción de los encuestados. ....	124
Figura 56. Medidas prioritarias para el cambio climático consideradas en le encuesta semiestructura.....	125
Figura 57. Respuestas a la cooperación internacional de los encuestados del MTOP.....	125
Figura 58. Principales amenazas climáticas identificadas para el tramo Loja-Catamayo de la RVE E-35.....	126
Figura 59. Opinión de la preparación de la vía ante el Cambio Climático. ....	126
Figura 60. Opinión sobre el reforzamiento de la infraestructura vial como medida de adaptación al cambio climático. ....	127
Figura 61. Relevancia de incluir a las comunidades en la toma de decisiones.....	127
Figura 62. Efectividad de las campañas de educación.....	128
Figura 63. Los primeros cuatro componentes explican más del 95% de la varianza total en los datos. ....	129
Figura 64. Patrones en las respuestas sobre vulnerabilidad y adaptación climática de la carretera. ....	130

## **1 Título**

Vulnerabilidad al cambio climático de la Red Vial Estatal, E-35 tramo Loja – Catamayo, en la provincia de Loja



## 2 Resumen

La Red Vial Estatal E-35, tramo Loja-Catamayo, en la provincia de Loja, Ecuador, está expuesta a fenómenos climáticos extremos que pueden afectar su infraestructura y transitabilidad. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la vulnerabilidad de este tramo vial al cambio climático, analizando las condiciones climáticas actuales y proyectadas bajo los escenarios SSP370 y SSP585, utilizando modelos climáticos globales del CMIP6, para los períodos 2015 - 2045 y 2046 - 2075. La metodología incluyó la recopilación y análisis de datos históricos de 1981-2010 de precipitación y temperatura de 19 estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio. Se aplicaron pruebas estadísticas para identificar valores atípicos y evaluar la homogeneidad de las series de datos. Posteriormente, se efectuó un análisis de vulnerabilidad de la vía utilizando indicadores técnicos relacionados con la exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa ante eventos climáticos extremos. Los resultados mostraron un régimen climático estacional histórico con lluvias intensas de febrero a abril y temperaturas extremadamente altas de marzo a octubre. Las proyecciones indicaron un aumento en la frecuencia e intensidad de eventos extremos durante el siglo XXI, especialmente bajo el escenario SSP585, período 2046-2075, con incrementos en la precipitación anual del 14% y en las temperaturas máximas, medias y mínimas anuales de 2,28 °C, 2,12 °C y 2,71 °C. Estos cambios indicados intensificarán la vulnerabilidad de la infraestructura vial y elevarían el riesgo en la seguridad vial en 20, 931 km de la vía Loja Catamayo que se caracterizan por una vulnerabilidad con categoría de alta. En conclusión, se evidencia la necesidad de adaptar urgentemente la infraestructura de transporte terrestre en esta región montañosa a las condiciones climáticas cambiantes. Se proponen medidas técnicas de adaptación, como mejoras en los sistemas de drenaje y sistemas de alerta temprana, así como un modelo de gobernanza participativo, para aumentar la resiliencia climática de la vía Loja-Catamayo.

Palabras clave: Vulnerabilidad, cambio climático, infraestructura vial, adaptación.

## 2.1. Abstract

The State Road Network E-35, section Loja-Catamayo, in the province of Loja, Ecuador, is exposed to extreme weather phenomena that can affect its infrastructure and transitivity. This study aimed to evaluate the vulnerability of this road section to climate change, analyzing the current and projected climatic conditions under the SSP370 and SSP585 scenarios using global climate models from CMIP6, for the periods 2015–2045 and 2046–2075. The methodology included the collection and analysis of historical data from 1981-2010 on precipitation and temperature from 19 weather stations near the study area. Statistical tests were applied to identify outliers and assess the homogeneity of the data series. Subsequently, a vulnerability analysis of the road was carried out using technical indicators related to exposure, sensitivity, and adaptive capacity to extreme weather events. The results showed a historical seasonal climate regime with intense rainfall from February to April and extremely high temperatures from March to October. The projections indicated an increase in the frequency and intensity of extreme events during the 21st century, especially under the SSP585 scenario for the period 2046-2075, with increases in annual precipitation of 14% and in the annual maximum, mean, and minimum temperatures of 2,28 °C, 2,12 °C, and 2,71 °C, respectively. These indicated changes will intensify the vulnerability of the road infrastructure and raise the risk to road safety on 20,931 km of the Loja Catamayo route, which is characterized by a high vulnerability category. Consequently, the urgent need to adapt the land transport infrastructure in this mountainous region to changing climatic conditions is evident. Technical adaptation measures are proposed, such as improvements in drainage systems and early warning systems, as well as a participatory governance model, to increase the climate resilience of the Loja-Catamayo road.

Keywords: Vulnerability, climate change, road infrastructure, adaptation.

### 3 Introducción

La infraestructura vial desempeña un papel fundamental en la conectividad y el desarrollo económico de las regiones, siendo un activo de vital importancia para el funcionamiento eficiente de cualquier país. Sin embargo, en la actualidad, enfrenta una amenaza significativa y creciente: los efectos del cambio climático. Esta investigación se centra en la vía Loja Catamayo (Red Vial Estatal E-35), en el tramo que conecta las ciudades de Loja y Catamayo en el sur de Ecuador. La relevancia de esta investigación radica en la creciente evidencia de que las condiciones climáticas extremas, como las altas temperaturas, las precipitaciones intensas y los eventos climáticos extremos, están provocando un impacto negativo en la infraestructura vial a nivel global (Foss, 2022; Guest et al., 2019; Walker et al., 2022).

Esta vía estratégica enfrenta riesgos significativos relacionados con eventos hidrometeorológicos extremos, como intensas precipitaciones, inundaciones, deslizamientos en áreas adyacentes e intensas olas de calor o frío, que amenazan la integridad de su infraestructura y operatividad. Ante este contexto, resulta fundamental llevar a cabo un análisis exhaustivo de su vulnerabilidad climática actual y futura, considerando tanto aspectos físicos como funcionales y operativos. Solo a través de este análisis integral será posible comprender plenamente los impactos potenciales sobre la transitabilidad de esta importante vía frente a la creciente variabilidad climática prevista para los próximos años y décadas en la región.

La importancia de esta investigación se refuerza en vista de la creciente conciencia de la necesidad de abordar la resiliencia de la infraestructura vial como parte esencial de las estrategias de adaptación al cambio climático y la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (Li y Chen, 2018). Además, la interrupción de la infraestructura vial puede tener efectos secundarios significativos, como la afectación de los servicios locales en áreas que dependen de la conectividad de estas vías (Jongman et al., 2012). Por lo tanto, es crucial comprender plenamente la vulnerabilidad de la infraestructura vial y tomar medidas proactivas para enfrentarla.

La infraestructura vial es particularmente vulnerable a los efectos adversos del cambio climático debido a su intrincada interacción con el entorno natural. La vulnerabilidad de las redes viales, incluyendo carreteras, puentes, alcantarillas y taludes, a los riesgos climáticos actuales y futuros ha sido documentada en numerosos estudios (Foss, 2022; Guest et al., 2019). Las temperaturas más elevadas pueden acelerar la oxidación del pavimento y exacerbar los ciclos de congelación y descongelación, lo que debilita la estructura de la infraestructura (Guest et al., 2019).

Además, los cambios en los patrones de precipitación pueden saturar el suelo, desestabilizar laderas y aumentar la ocurrencia de deslizamientos de tierra, lo que puede obstruir o destruir carreteras (Walker et al., 2022). Los eventos climáticos extremos, como tormentas, inundaciones y deslizamientos de tierra, plantean desafíos adicionales para la integridad de elementos clave, como puentes, alcantarillas y taludes (Pembuain et al., 2019). Se prevé que los impactos del cambio climático en la infraestructura vial sean sustanciales, especialmente con el aumento del nivel del mar, el aumento de las temperaturas y los patrones de precipitación cada vez más extremos (Deimling et al., 2021).

Además, se ha reconocido la importancia de mejorar la resiliencia de la infraestructura vial como una condición neCésaria para cualquier estrategia de adaptación, resaltando la interconexión entre la contribución del transporte por carretera a la mitigación del cambio climático y la transición hacia fuentes de energía más sostenibles (Li y Chen, 2018). La vulnerabilidad de la infraestructura vial también está relacionada con los efectos secundarios de las interrupciones inesperadas de estas vías y su impacto en la disponibilidad de servicios locales en áreas que dependen de ellas (Jongman et al., 2012). Por lo tanto, es crucial tener en cuenta los impactos a largo plazo de las decisiones de planificación y desarrollo de infraestructura vial, ya que estas pueden intensificar las condiciones de bloqueo y poner en peligro la conectividad y la seguridad (Chamorro et al., 2020).

La vulnerabilidad de la infraestructura vial estratégica de Ecuador cobra una importancia especial debido a la diversidad de factores geográficos que caracterizan al país, como su ubicación en la región tropical y la presencia de las cordilleras de los Andes que lo atraviesan de norte a sur, junto con su extensa costa en el Pacífico, entre otros. Estos factores predisponen a diferentes regiones del país a impactos climáticos específicos (Koks et al., 2019). Estudios a nivel global revelan que aproximadamente el 27 % de todos los activos viales y ferroviarios a nivel mundial están expuestos a al menos un riesgo climático, y alrededor del 7,5 % de estos activos están expuestos a eventos de inundación con una probabilidad de 1/100 años (Koks et al., 2019). Investigaciones previas también han subrayado que, debido a su exposición a condiciones ambientales, los sistemas de infraestructura de transporte, incluyendo carreteras, son particularmente vulnerables al cambio climático (Chinowsky et al., 2014; Roy et al., 2023; Kapskii, Bogdanovich, & Burtyl, 2023).

La Red Vial Estatal (RVE) E-35 Loja - Catamayo, sirve como un enlace esencial con ciudades sureñas como Loja y Catamayo en la región 7, e incluso con la frontera internacional con Perú. Dada su importancia estratégica y su ubicación geográfica, el tramo entre Loja - Catamayo exhibe una susceptibilidad especial a los impactos de eventos hidroclimáticos extremos que se espera que aumenten en frecuencia e intensidad debido al cambio climático. Sumado a esto, la potencial sobrecarga vehicular y otros factores antropogénicos generan evidencia de las limitaciones en la capacidad actual de este tramo para absorber futuras perturbaciones, lo cual pone en riesgo su correcto funcionamiento y la provisión constante de sus servicios a las comunidades locales. Por lo tanto, el objetivo central de esta investigación es analizar la vulnerabilidad de la Red Vial Estatal E-35 en el tramo Loja-Catamayo al cambio climático, proponiendo medidas de adaptación y fortaleciendo su capacidad para enfrentar un clima cambiante.

Los objetivos que guiaron el desarrollo del estudio fueron: determinar las condiciones climáticas actuales de precipitación y temperatura sobre la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja – Catamayo; evaluar la vulnerabilidad actual y futura, periodo 1981 - 2075 de la Red Vial Estatal RVE E - 35, tramo Loja – Catamayo, en un contexto de cambio climático para una comprensión adecuada en la gestión y desarrollo infraestructura vial sostenible y, crear una propuesta de adaptación al cambio climático para la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja - Catamayo, a través de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.

## 4 Marco teórico

### 4.1 Cambio climático

El cambio climático, definido como la alteración del clima atribuida a actividades humanas que modifican la composición atmosférica (CMNUCC, 1992), representa un desafío creciente para la infraestructura vial en general (Baker et al., 2010) y para la red vial E-35 de manera particular. Esto se debe a sus impactos potenciales sobre el deterioro del pavimento, inestabilidad de suelos, incremento en costos de mantenimiento, entre otros efectos citados por Baker et al. (2010).

Para evaluar la vulnerabilidad específica de la vía E-35, es necesario analizar las tendencias y proyecciones climáticas regionales, especialmente de eventos extremos como precipitaciones intensas y sequías, que pueden afectar significativamente las vías o carreteras. La vulnerabilidad depende de la exposición a amenazas climáticas futuras, la sensibilidad de la infraestructura vial a esas amenazas, y su capacidad adaptativa, de acuerdo con los conceptos propuestos por el IPCC<sup>1</sup> (2014).

#### 4.1.1 Definición y conceptos clave relacionados con el cambio climático.

Según el IPCC (2014), el cambio climático es un fenómeno global que afecta a todos los países, y que se produce principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero. Werndl (2016) ofrece dos definiciones complementarias de este fenómeno. La primera lo define como un cambio en los patrones climáticos que dura típicamente décadas o más. La segunda definición se refiere al cambio en las condiciones promedio del clima, como temperatura y precipitaciones, también en periodos prolongados.

El cambio climático conlleva modificaciones complejas en los patrones climáticos a escala global, involucrando diversos conceptos interrelacionados que permiten analizar sus causas, impactos y posibles respuestas. Lo anterior se alinea con los hallazgos de (Meehl et al., 2007). Los autores discuten el cálculo de las diferencias de temperatura de cada miembro del conjunto multimodelo, enfatizando la necesidad de comprender los posibles patrones comunes a gran escala de la señal de cambio climático. Esto pone de relieve la complejidad y la naturaleza

---

<sup>1</sup> Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

interrelacionada de los patrones climáticos a escala mundial, lo cual es esencial para analizar las causas, los impactos y las respuestas al cambio climático.

#### **4.2 Tendencias climáticas históricas y proyecciones futuras en la región.**

Las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés) proporcionan un marco para comprender las diferentes trayectorias de desarrollo y sus posibles impactos en el cambio climático global sobre la base de los niveles de forzamiento radiativo proyectados para el año 2100 (Vuuren et al., 2011). Estos escenarios, como SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-6.0 y SSP5-8.5, ofrecen información sobre diversas condiciones socioeconómicas y ambientales futuras, cada una asociada con valores específicos de forzamiento radiativo (Vuuren et al., 2011; Spinoni et al., 2021).

El forzamiento radiativo se refiere a la capacidad de ciertos agentes, como los gases de efecto invernadero y las partículas en suspensión, para alterar el balance energético de la Tierra al absorber y emitir radiación en la atmósfera. Este fenómeno es fundamental para comprender el cambio climático, ya que los diferentes niveles de forzamiento radiativo proyectados para el año 2100 en los escenarios de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) tienen impactos directos en el clima global (Bala et al., 2008).

Los escenarios SSP, como SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP4-6.0 y SSP5-8.5, proporcionan información detallada sobre las condiciones socioeconómicas y ambientales futuras, cada una asociada con valores específicos de forzamiento radiativo. Estos escenarios son cruciales para comprender las posibles trayectorias de desarrollo y sus consecuencias en el cambio climático global (Dietz & Stern, 2015).

El forzamiento radiativo puede ser influenciado por diversas variables, como los gases de efecto invernadero, las partículas en suspensión y otros factores que afectan la cantidad de energía solar absorbida por la Tierra. Comprender cómo estas variables interactúan y contribuyen al forzamiento radiativo es esencial para predecir y mitigar los efectos del cambio climático en el futuro (Webb et al., 2017).

Por ejemplo, SSP1-2.6 representa un mundo en transición hacia la sostenibilidad con un enfoque en bajas emisiones de carbono y políticas respetuosas con el medio ambiente, lo que refleja un forzamiento radiativo de 2,6 W/m<sup>2</sup>, lo que indica un escenario optimista para la mitigación del cambio climático (Vuuren et al., 2011). Por el contrario, SSP5-8.5, con el

forzamiento radiativo más alto de 8,5 W/m<sup>2</sup>, retrata un mundo que prioriza el crecimiento económico sobre la sostenibilidad ambiental, lo que lleva al uso intensivo de combustibles fósiles y altas emisiones de gases de efecto invernadero, prediciendo los cambios más drásticos y dañinos en el clima global (Spinoni et al., 2021).

Los SSP también abarcan escenarios como el SSP3-7.0, que describe un mundo fragmentado con un enfoque en la seguridad nacional y las políticas regionales, lo que da como resultado una alta dependencia de los combustibles fósiles y un forzamiento radiativo de 7,0 W/m<sup>2</sup>, lo que indica un calentamiento significativo y un cambio climático considerable debido a la falta de políticas climáticas efectivas (Nazarenko et al., 2022). Además, la SSP4-6.0 se centra en un mundo de creciente desigualdad, en el que algunos países realizan avances tecnológicos y de mitigación, mientras que otros se quedan atrás, lo que refleja un forzamiento radiativo de 6,0 W/m<sup>2</sup>, lo que significa un nivel relativamente alto de cambio climático (Nazarenko et al., 2022).

Los SSP ofrecen un marco integral para comprender las posibles implicaciones de las diferentes vías socioeconómicas en el cambio climático mundial, proporcionando información valiosa para que los responsables de la formulación de políticas y los investigadores evalúen y planifiquen escenarios climáticos futuros (Alizadeh et al., 2022).

Tal como indica la CEPAL (2020), las tendencias climáticas históricas y proyecciones futuras en Sudamérica muestran un incremento de la temperatura media y una disminución de las precipitaciones. Estos cambios pueden tener efectos adversos en la infraestructura vial de la región.

Específicamente, los estudios de Marengo et al. (2012) establecieron grandes reducciones de lluvia en la Amazonía y noreste de Brasil, y aumentos en el norte de Perú y Ecuador, y sureste de Sudamérica. Los cambios serán más intensos después de 2040. Asimismo, Ortega et al. (2021) y Olmo et al. (2022) proyectan un clima más cálido y extremo en Sudamérica, con aumentos de temperatura de hasta 6 °C y mayor frecuencia de olas de calor y sequías.

Para Ecuador, Chimborazo y Vuille (2021) proyectan incrementos de 1 a 2 °C para mediados de siglo respecto a fines del siglo XX. Morán-Tejeda et al. (2016) encontraron relación entre precipitaciones y El Niño, con aumentos en los Andes ecuatorianos. Las tendencias y proyecciones climáticas indican cambios significativos en Ecuador y la región, con implicaciones importantes para la planificación y gestión de infraestructura vial ante amenazas como olas de calor, sequías, precipitaciones intensas y mayor variabilidad climática (fuente).



### **4.3 Efectos del cambio climático en la región, incluyendo eventos extremos y variabilidad climática.**

Tal como señalan Hagen et al. (2021) y Suastegui Cruz (2021), el cambio climático en esta región conlleva riesgos para la seguridad alimentaria, infraestructura y salud, debido a alteraciones en los patrones de precipitación y mayor frecuencia de sequías. Olmo et al. (2020) relacionan la ocurrencia de eventos extremos con tipos específicos de circulación atmosférica.

El Banco Interamericano de Desarrollo - BID (2020) indica que el cambio climático está incrementando la frecuencia e intensidad de eventos climáticos extremos en América del Sur y Central, lo cual puede tener efectos adversos en la infraestructura vial y la seguridad. Entre los impactos del cambio climático se encuentran eventos como inundaciones, deslizamientos, sequías y mayor variabilidad climática en general. Estos efectos pueden desestabilizar la infraestructura vial y elevar los costos de mantenimiento y reparación (BID, 2020).

La evidencia señala múltiples amenazas derivadas del cambio climático en la región, con consecuencias negativas sobre aspectos clave como la producción de alimentos, la salud, la estabilidad de la infraestructura y la seguridad ante eventos climáticos extremos. Estos impactos deben considerarse en la planificación y gestión de la infraestructura vial.

### **4.4 Contribución humana al cambio climático**

Tal como indica la ONU (2019), la actividad humana ha contribuido significativamente al cambio climático, por lo que es necesario reducir urgentemente las emisiones de gases de efecto invernadero y promover prácticas sostenibles, incluso en el sector de la infraestructura vial. Austen (2021) y Chand (2021) argumentan que el crecimiento poblacional y las actividades humanas que generan gases de efecto invernadero son la causa principal del cambio climático. Hope et al. (2020) cuantifican la contribución humana al calentamiento global en 0,14 °C por década entre 1979 y 2010.

Las actividades humanas están desestabilizando el clima global. El crecimiento poblacional impacta al cambio climático, pues modificaciones en variables climáticas generan diferencias sustanciales en las tasas de crecimiento poblacional (Louthan y Morris, 2021). La deforestación también emite gases de efecto invernadero exacerbando el calentamiento; la agricultura extensiva resultante reduce precipitaciones y aumenta la temperatura regionalmente (Maeda et al., 2021). Finalmente, las emisiones antropogénicas liberan grandes cantidades de carbono a la atmósfera,

evidenciando la influencia humana en la alteración del sistema climático (Friedlingstein et al., 2022). En síntesis, el aumento poblacional, la deforestación y las emisiones de gases de efecto invernadero por actividades humanas están impactando significativamente el equilibrio climático global.

#### **4.5 Vulnerabilidad, riesgo y su aplicación en el contexto del cambio climático.**

La vulnerabilidad, según el IPCC (2014), es la susceptibilidad de un sistema a ser afectado por eventos climáticos extremos. El riesgo, por otro lado, se refiere a la probabilidad de que estos eventos ocurran y sus posibles consecuencias.

Abraham et al. (2019) destacan la importancia de evaluar la vulnerabilidad y el riesgo para implementar medidas de adaptación efectivas en infraestructura vial. Fakhruddin et al. (2020) resaltan que las herramientas de evaluación se centran en peligros asociados a eventos extremos. BirKmann y Welle (2015) observaron diferencias en los riesgos entre países de ingresos altos y bajos.

Metodologías como el análisis de riesgos y la evaluación de vulnerabilidad son cruciales para evaluar la vulnerabilidad proporciona información decisiva sobre la capacidad de las carreteras de montaña para resistir y recuperarse de eventos adversos, permitiendo priorizar acciones de fortalecimiento y adaptación (Cepeda & Colome, 2014). Al aplicar metodologías como el análisis de riesgos, se pueden identificar los posibles eventos adversos que podrían afectar la seguridad de las carreteras de montaña, como deslizamientos de tierra, avalanchas, o condiciones climáticas extremas, lo que permite tomar medidas preventivas y correctivas para mitigar su impacto (Guerra et al., 2021). Factores como la ubicación geográfica, la calidad de la infraestructura y la exposición poblacional son esenciales, como lo demuestra el estudio de Fernandes et al. (2022).

Según el IPCC (2007, 2014) y la AIPCR (2015), la vulnerabilidad se relaciona con la susceptibilidad a los impactos del cambio climático, incluyendo la sensibilidad al daño y la falta de capacidad de adaptación. El riesgo, en cambio, se asocia con la probabilidad de eventos extremos y sus efectos.

La vulnerabilidad depende de factores como el cambio climático, la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa del sistema (IPCC, 2007). La Figura 1 ilustra la relación entre estos componentes, incluyendo la exposición, la sensibilidad, la capacidad de adaptación y el impacto potencial del cambio climático.

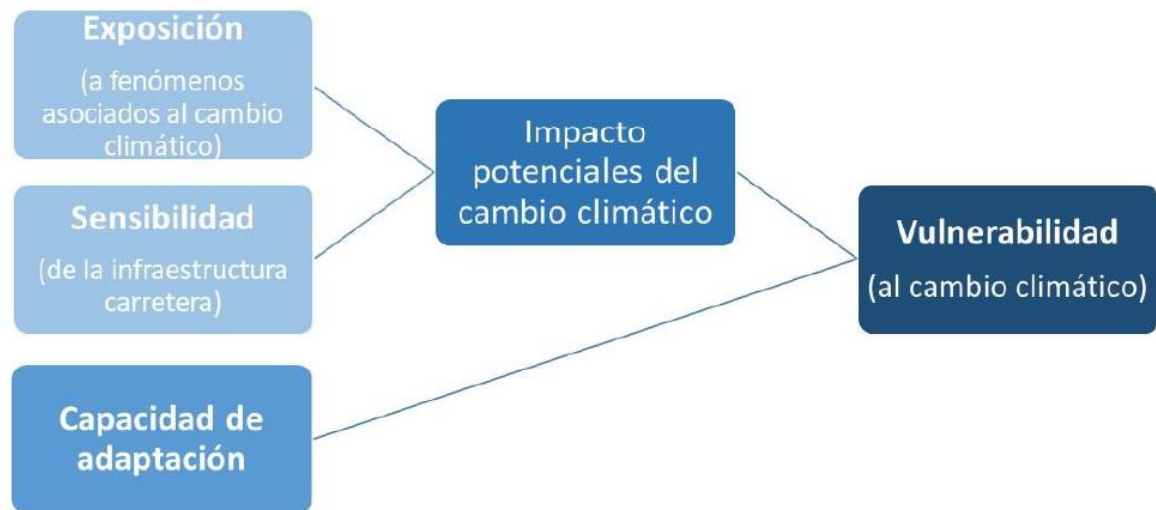


Figura 1. Relación entre los Componentes de la Vulnerabilidad. (Mendoza-Sánchez et al., 2019).

Estudios en diversas regiones, como África (Roux, 2019), Canadá (McGregor et al., 2008), Nigeria (Ibeje, 2021) y México (Espinet et al., 2016), muestran los impactos del cambio climático en carreteras, destacando la importancia de considerar estas amenazas en la planificación de infraestructura de transporte.

El cambio climático influirá en el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, como indican Enríquez-de-Salamanca (2019) y Taylor y Philp (2015). Estos impactos se están integrando progresivamente en políticas y literatura sobre infraestructura (Jacobs et al., 2013).

Taylor (2020) define la vulnerabilidad vial como la capacidad funcional ante eventos extremos, influenciada por la sensibilidad, exposición a amenazas climáticas y la capacidad adaptativa del sistema.

La evidencia muestra que la infraestructura vial es altamente vulnerable al cambio climático debido a los impactos sobre el funcionamiento y desempeño ante eventos extremos. Evaluar estos factores de sensibilidad, exposición y adaptación es clave para aumentar la resiliencia.

#### **4.6 Metodologías de evaluación de la vulnerabilidad en el contexto de la infraestructura vial.**

Berdica y Mattsson (2007) describen tres métodos principales para evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante el cambio climático: evaluación de riesgos, modelado

de confiabilidad de red y análisis de costo-beneficio. Estos métodos son fundamentales para identificar amenazas, entender la respuesta del sistema y sopesar los costos frente a los beneficios de las estrategias de adaptación. En la misma línea, existen diversas metodologías propuestas por otros investigadores. Por ejemplo, Lu et al. (2021), Tarrago Garay et al. (2020) y Hearn y Pongpanya (2021) han desarrollado enfoques que consideran distintos atributos de la infraestructura vial, ampliando el espectro de análisis en este campo.

Por otro lado, Taylor (2017) identifica cuatro enfoques principales para la evaluación de la vulnerabilidad vial: evaluación de riesgos basada en inventario, métodos basados en topología, en capacidad de servicio y en accesibilidad. Este autor analiza las diferencias, relaciones y aportes de cada uno de estos enfoques, proporcionando una visión integral de las metodologías disponibles. Posteriormente, Taylor (2020), destaca tres enfoques específicos para la infraestructura vial: análisis de inventario de activos, análisis de vulnerabilidad basado en servicio y basado en accesibilidad. Estos métodos, tanto cuantitativos como cualitativos, son útiles para evaluar la vulnerabilidad de la red vial desde diferentes perspectivas, permitiendo identificar puntos críticos y desarrollar estrategias efectivas de adaptación ante el cambio climático.

#### ***4.6.1 Análisis de vulnerabilidad.***

Tonmoy (2013) subraya que la evaluación de vulnerabilidad permite entender los potenciales impactos climáticos y orientar estrategias de adaptación para reducir riesgos, así como identificar áreas prioritarias para investigación.

La vulnerabilidad depende de la exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa, según Issac et al. (2019). Sharma y Ravindranath (2019) señalan la utilidad del marco del IPCC para reducir la vulnerabilidad actual. McNamara et al. (2019) identifican variables clave que determinan la vulnerabilidad en un caso de estudio.

La exposición se refiere a la probabilidad de que la infraestructura vial se vea afectada por peligros externos, incluyendo, pero no limitándose a, su ubicación geográfica en áreas propensas a inundaciones o deslizamientos de tierra. Este enfoque se sustenta en la literatura existente que sugiere la importancia crítica de la ubicación geográfica y los factores ambientales en la evaluación de riesgos (Oliveira et al., 2018).

La sensibilidad, por otro lado, se centra en las características inherentes de la infraestructura vial, como los materiales de construcción y su capacidad para resistir y recuperarse de los daños causados por eventos climáticos extremos. Esta dimensión aborda la intrínseca vulnerabilidad material y estructural de las carreteras, destacando la importancia de las especificaciones técnicas en la resistencia y durabilidad de la infraestructura (Pitilakis et al., 2016).

Finalmente, la capacidad de adaptación se relaciona con los recursos económicos, tecnológicos y organizacionales disponibles para anticipar, responder y recuperarse de los impactos de los desastres naturales. Este aspecto subraya la relevancia de una planificación eficaz y una gestión de recursos adecuada para mitigar los efectos adversos sobre la infraestructura vial (Mavrouli et al., 2019).

Al evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura vial, se empleará un enfoque cuantitativo, utilizando indicadores y métricas específicos para medir la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación. Para cuantificar la exposición, la atención se centrará en identificar la vulnerabilidad de las carreteras a los peligros naturales, como las inundaciones o los deslizamientos de tierra. Esto se alinea con el trabajo de Cutter et al. (2003), quienes enfatizaron la importancia de considerar la distribución espacial de las amenazas en las evaluaciones de vulnerabilidad.

Para la evaluación de la sensibilidad, el análisis profundizará en las características de los materiales de construcción utilizados en la infraestructura vial y su susceptibilidad al deterioro causado por eventos climáticos. Este enfoque está respaldado por la investigación de Fekete et al. (2018), quienes destacaron la importancia de comprender las vulnerabilidades físicas de los elementos de infraestructura en las evaluaciones de vulnerabilidad.

Al evaluar la capacidad de adaptación, el examen incluirá factores como la disponibilidad de recursos económicos para el mantenimiento y el refuerzo de la infraestructura vial. Este aspecto concuerda con las conclusiones de Pelling (2003), quien destacó el papel de los recursos financieros y las capacidades institucionales en la mejora de la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima.

Evaluar la vulnerabilidad de infraestructuras estratégicas como las viales es crucial para formular estrategias de adaptación climática efectivas, según Gradilla Hernández et al. (2018). Esto requiere cuantificar variables críticas que impactan directamente su resiliencia. En adaptación vial es clave analizar cómo responden ante estrés climático, componente como puentes, carreteras

y sistemas de drenaje, identificando puntos susceptibles a daños. Posteriormente, se aplican herramientas para evaluar tanto la vulnerabilidad física como socioeconómica de estas estructuras.

Es indispensable adoptar un enfoque integral, que no solo implique comprender los riesgos climáticos específicos, sino también desarrollar medidas que refuercen la resiliencia vial de forma efectiva y sostenible. Esto facilita una comprensión más profunda de los retos climáticos para la implementación de estrategias adaptativas óptimas (Gradilla Hernández et al. 2018).

#### **4.6.2 Evaluación de riesgo**

La evaluación de riesgos en el contexto de la infraestructura vial implica un proceso integral, como lo describe el IPCC (2014). Este proceso incluye la identificación de peligros, la determinación de su probabilidad de ocurrencia y la evaluación de las posibles consecuencias para mitigar los riesgos de manera efectiva. Para lograr esto, se utilizan varias herramientas y modelos para analizar peligros como inundaciones y deslizamientos de tierra, y su impacto potencial en la red de carreteras. Estas herramientas pueden incluir modelos hidrológicos e hidráulicos, modelos de estabilidad de taludes y sistemas de información geográfica (SIG) para mapear áreas de riesgo (Chamorro et al., 2020) y.

Algunas de las complejidades y limitaciones señaladas por Feng y Chao (2020) y Wilby et al. (2009) en la evaluación de riesgos climáticos incluyen la incertidumbre inherente en los modelos climáticos, la variabilidad natural del clima, la falta de datos precisos a escalas locales y la dificultad para proyectar eventos extremos. Estas limitaciones se abordarán mediante el uso de múltiples escenarios climáticos, la incorporación de rangos de incertidumbre y la validación de los modelos con datos históricos.

#### **4.6.3 Análisis de impacto**

El IPCC (2014) define impactos climáticos como las consecuencias en sistemas humanos y naturales derivadas de fenómenos climáticos extremos o cambios en el clima, involucrando aspectos como salud, economía, infraestructura y vulnerabilidad. La evaluación de estos impactos se enfoca en analizar las consecuencias del cambio climático en el transporte y proponer medidas de reducción, bajo distintos escenarios climáticos futuros.

La Figura 2 ilustra cómo los registros históricos de eventos climáticos extremos que han afectado carreteras permiten identificar peligros principales y determinar impactos del cambio climático en la infraestructura carretera en México. El enfoque clave es evaluar las consecuencias del cambio climático en la infraestructura vial mediante herramientas y modelos, bajo escenarios futuros, y luego plantear medidas de reducción de impactos potenciales.



Figura 2. Esquema para la determinación de impactos del cambio climático en la infraestructura carretera en México. (Mendoza-Sánchez et al., 2019)

#### 4.7 Factores que influyen en la vulnerabilidad.

El IPCC (2014) resalta factores como la ubicación geográfica, la calidad de la infraestructura existente y la capacidad adaptativa como determinantes de la vulnerabilidad de las carreteras, destacando que aquellas en zonas costeras y montañosas son especialmente vulnerables. Esta perspectiva es complementada por BirKmann et al. (2014), quienes enfatizan la importancia de factores sociales, económicos, ambientales, tecnológicos y políticos en la capacidad adaptativa regional. Kelly y Adger (2000) añaden a esta visión la relevancia del acceso a recursos y derechos.

Thomas et al. (2019) y Thornton et al. (2014) profundizan en la influencia de componentes sociales, económicos, históricos y políticos, así como en la gestión de la variabilidad climática. La vulnerabilidad y el riesgo climático de la infraestructura vial, dependen de múltiples factores interrelacionados. Esto incluye características geográficas, calidad de la infraestructura, capacidad adaptativa, acceso a recursos, derechos, y elementos sociales, económicos, políticos e históricos. Su análisis integral es clave para una adecuada gestión del riesgo climático en el sector vial.

## **4.8 Infraestructura vial**

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) en 2014 identificó varios factores críticos que influyen en la vulnerabilidad de la infraestructura vial al cambio climático. Estos incluyen la ubicación geográfica, la calidad de la infraestructura existente y la capacidad adaptativa de la región. Por ejemplo, las carreteras situadas en zonas costeras y montañosas son particularmente más vulnerables, debido a su exposición a fenómenos climáticos extremos y a la erosión.

Ampliando esta perspectiva, BirKmann et al. (2014) destacan la importancia de considerar factores sociales, económicos, ambientales, tecnológicos y políticos en la evaluación de la capacidad adaptativa regional. De manera similar, Kelly y Adger (2000) subrayan la relevancia del acceso a recursos y derechos como elementos cruciales en la capacidad de una comunidad para adaptarse a los cambios climáticos. Además, Thomas et al. (2019) y Thornton et al. (2014) resaltan la influencia de componentes sociales, económicos, históricos y políticos, así como la gestión de la variabilidad climática, en la vulnerabilidad de la infraestructura vial.

Por lo tanto, es evidente que la vulnerabilidad y el riesgo climático de la infraestructura vial dependen de una compleja red de factores interrelacionados. Estos abarcan desde características geográficas y la calidad de la infraestructura hasta la capacidad adaptativa, el acceso a recursos, los derechos y diversos elementos sociales, económicos, políticos e históricos. Un análisis integral de estos factores es clave para una gestión efectiva del riesgo climático en el sector vial, permitiendo el desarrollo de estrategias de adaptación más robustas y sostenibles.

## **4.9 Impactos**

Gradilla Hernández et al. (2018) señalan la importancia de comprender los impactos espaciales del cambio climático en carreteras para identificar componentes vulnerables y estrategias de adaptación. Meyer et al. (2014) y Taylor (2020) destacan que variables climáticas como temperatura, humedad y precipitaciones influyen en ubicación, diseño, construcción, operación y mantenimiento de infraestructura de transporte. Entre los impactos se encuentran movimientos de suelo, efectos en el subsuelo, reducción de vida útil de pavimentos, tensiones en puentes, y daños por eventos extremos más frecuentes.



Shao (2017) y Shahid y Minhans (2016) indican que el cambio climático puede dañar infraestructura vial por alteraciones de temperatura y precipitación, y eventos extremos más frecuentes. Espinet et al. (2016) advierten que no considerar el clima en proyectos viales dificulta reducir sus impactos. Adaptarse requiere ajustes en gobernanza y diseño de infraestructura para operar efectivamente ante el clima cambiante. El análisis de impactos climáticos en infraestructura vial es esencial para identificar vulnerabilidades específicas y adoptar medidas que incrementen la resiliencia y adaptabilidad del sector.

#### **4.10 La gestión de los impactos del cambio climático en la infraestructura vial**

Axelsen et al. (2016) proponen un enfoque para implementar medidas de adaptación climática en carreteras, y definen la adaptación vial al clima como medidas para reducir la vulnerabilidad ante eventos extremos y aumentar la resiliencia. En la misma línea, Wang et al. (2019) plantean un marco para la planificación de adaptación climática en sistemas viales, garantizando su resiliencia ante riesgos como inundaciones, mientras que Wang et al. (2020) ofrecen un marco para priorizar estas medidas de adaptación.

Por su parte, Meyer y Weigel (2011) recomiendan utilizar la gestión de sistemas adaptativos. Abreu et al. (2022) sugieren aplicar medidas de adaptación evaluadas con un marco específico y mediante un enfoque de gestión adaptativa. La UNEP (2018) señala que gestionar el impacto climático en infraestructura vial debe ser una tarea integral y multidisciplinaria, incluyendo estrategias como evaluar vulnerabilidad, incorporar adaptación en planificación y diseño, mantenimiento y gestión adecuados, y coordinación entre actores.

Se requiere una combinación de medidas preventivas, adaptativas y de mitigación, así como un enfoque colaborativo con diferentes actores, para gestionar efectivamente el impacto del cambio climático en el sector vial.

#### **4.11 Adaptación**

Según señala Taylor (2020), las definiciones de adaptación al cambio climático varían, pero coinciden en la necesidad de un enfoque sistemático para minimizar efectos dañinos potenciales y aprovechar impactos beneficiosos. En infraestructura vial, la adaptación implica anticipar impactos adversos y adoptar medidas planificadas para prevenir o minimizar daños, o

aprovechar oportunidades climáticas. Es clave un enfoque sistemático de adaptación que aumente la resiliencia vial mediante acciones coordinadas a diferentes niveles, considerando las variaciones regionales en vulnerabilidad y capacidad de adaptación.

Schmidt-Thomé (2017) distingue entre adaptación incremental, para mantener el sistema, y transformacional, que modifica atributos fundamentales ante efectos climáticos. La Unión Europea ha implementado una estrategia de adaptación que promueve la coordinación entre estados, reconociendo diferencias regionales en capacidad adaptativa (Taylor, 2020).

#### ***4.11.1 Principios de planificación de la adaptación***

Prutsch et al. (2010) proponen 10 principios clave para la adaptación al cambio climático, que incluyen el enfoque proactivo, la flexibilidad, evaluación integral del riesgo, planificación a largo plazo, diseño resiliente, redundancia y diversidad, colaboración y coordinación, monitoreo y evaluación, integración con otros objetivos y comunicación y concientización. Según Taylor (2020), se requiere un proceso flexible de planificación, aplicación y evaluación, que se adapte a las circunstancias cambiantes. Prutsch et al. (2010) también plantean un procedimiento específico que incluye análisis de impactos, evaluación de vulnerabilidades, priorización de medidas, y consideración de factores no climáticos.

En infraestructura vial, la adaptación debe seguir un enfoque sistemático, que incorpore compromiso de actores, cooperación interinstitucional, gestión de incertidumbre, exploración de opciones, monitoreo y modificación ante nuevas necesidades. Es clave identificar componentes y rutas vulnerables, modelar escenarios climáticos y socioeconómicos futuros, evaluar impactos potenciales, priorizar medidas de adaptación viable y establecer criterios de importancia de impactos junto a partes interesadas.

El proceso requiere investigación, seguimiento y ajustes periódicos para garantizar una adaptación efectiva que incremente la resiliencia vial al clima cambiante, manteniendo una perspectiva proactiva y colaborativa en todos los niveles.

#### **4.12 Gestión del riesgo**

La gestión de riesgos climáticos vincula la adaptación con la gestión de riesgos de desastres y requiere evaluar y responder preventivamente a riesgos climáticos, mediante aprendizaje y gestión adaptativa, y financiamiento (Bles et al., 2016 y Rychetnik et al., 2019). La evaluación de riesgos es clave para proteger activos y lograr adaptación, enfatizando la necesidad de considerar factores estresores climáticos como temperatura, humedad, precipitaciones, viento y la altitud sobre el nivel del mar, tanto en eventos extremos como cambios graduales (Prabhakar et al. 2013).

Taylor (2020) resalta que el cambio climático representa un desafío ante eventos extremos que impactan activos y comunidades. Existen diversos marcos de adaptación para evaluar riesgos climáticos, como los propuestos por FHWA<sup>2</sup> y PIARC<sup>3</sup>. El marco de FHWA, por ejemplo, propone un proceso de 7 pasos para garantizar una exhaustiva evaluación de riesgos y efectiva adaptación.

En conclusión, una evaluación integral de riesgos, mediante marcos sistemáticos, es esencial para obtener una visión completa de la vulnerabilidad vial al clima cambiante y adoptar estrategias efectivas de adaptación que protejan tanto la infraestructura como las comunidades.

#### **4.13 Participación ciudadana:**

El Reglamento Ambiental del Ecuador establece el derecho a la participación ciudadana en la gestión ambiental a través de mecanismos como los Consejos Ciudadanos Sectoriales y Consultivos (RCOA, 2019). Esta participación ciudadana es clave en la gobernanza climática y para superar barreras a la acción colectiva, como indica el IPCC (2022). En infraestructura vial, fomentar la participación ciudadana mediante estos mecanismos legales y el apoyo gubernamental puede mejorar la adaptación y resiliencia ante el clima cambiante.

Mees et al. (2019) y Wi (2019) señalan que una participación pública efectiva en adaptación climática requiere del apoyo gubernamental y políticas educativas. Sin embargo, Hügel y Davies (2020) evidencian una limitada alineación de perspectivas sobre este tema, lo que a veces da como resultado una falta de participación en planes climáticos, como señalan Velasco-Martínez

---

<sup>2</sup> Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos

<sup>3</sup> Asociación Mundial de la Carretera

et al. (2020). Se requieren mayores estudios para alinear perspectivas y superar barreras en este campo.

#### **4.14 Financiamiento.**

Steckel et al. (2017) destacan la importancia de la financiación climática para facilitar un desarrollo económico más sostenible y su papel clave en la transición hacia prácticas bajas en carbono, lo que es crítico para la adaptación en infraestructura vial. Esta idea es reforzada por Chinowsky et al. (2011) y Espinet y Rozenberg (2018), quienes subrayan que la falta de financiamiento adecuado representa un obstáculo importante para la adaptación vial frente al clima cambiante. Por lo tanto, contar con fuentes sostenibles de financiación es indispensable para que el sector vial evolucione hacia prácticas más resilientes.

En paralelo, Twerefou et al. (2015) observan que los estudios sobre los impactos climáticos en carreteras han sido principalmente cualitativos. Serrao-Neumann et al. (2011) efectúan un análisis cualitativo de estos impactos, recomendando adaptaciones en el diseño y mantenimiento vial. Sin embargo, resalta la necesidad de pasar de estudios cualitativos a la cuantificación de costos e inversiones requeridas, enfatizando la importancia de asignar recursos de manera proactiva, estratégica y eficaz para desarrollar una infraestructura vial verdaderamente resiliente.

#### **4.15 Estudios recientes sobre vulnerabilidad de la infraestructura vial al cambio climático**

Chinowsky et al. (2015), Azaki y Lutfi (2022) y Sağır y Sahal (2022) evidencian cómo el cambio climático amenaza la seguridad de las carreteras en el mundo, subrayando la importancia de cuantificar las necesidades de inversión para la adaptación. Estudios como los de Lu et al. (2021), Hussain et al. (2018), Underwood et al. (2017) y Qiao et al. (2020) complementan esta visión, demostrando los impactos del aumento de precipitaciones y temperatura en el deterioro, costos y desempeño de pavimentos. Espinet et al. (2016) y Chinowsky et al. (2013) refuerzan la necesidad de considerar proyecciones climáticas en proyectos viales sostenibles, mientras que Enríquez-de-Salamanca (2019) advierte sobre nuevos impactos ambientales de la adaptación vial.

Por otro lado, el Departamento de Transporte de EE. UU llevó a cabo un análisis en los años 90 sobre la vulnerabilidad vial de Nueva York al aumento del nivel del mar, demostrando la

relevancia de estudios específicos de vulnerabilidad. Del mismo modo, el Proyecto Europeo ROADAPT (Axelsen et al., 2016; Bles et al., 2016) proporciona directrices para adaptar carreteras al clima futuro y reducir vulnerabilidad a peligros como inundaciones. En síntesis, los estudios de vulnerabilidad vial al clima son esenciales para que gobiernos y entidades adopten medidas informadas de adaptación, reduzcan riesgos y garanticen la seguridad ante el cambio climático.

## 5 Metodología.

### 5.1 Área de estudio

La Zona 7 de Ecuador está situada en el extremo sur del territorio ecuatoriano, incluyendo el archipiélago de Jambelí, la zona costera de la provincia de El Oro, toda la provincia de Loja y la porción amazónica oriental de la provincia de Zamora Chinchipe. Está delimitada por las líneas de 3° y 5° de latitud sur y 78° y 81° de longitud oeste. Limita al norte con las provincias de Guayas, Azuay y Morona Santiago; al sur y al este con la República del Perú y al oeste con el Océano Pacífico. La Región Sur ocupa una superficie de unos 40 000 km<sup>2</sup>, lo que representa más del 14 % de la superficie total del país (Figura 3).

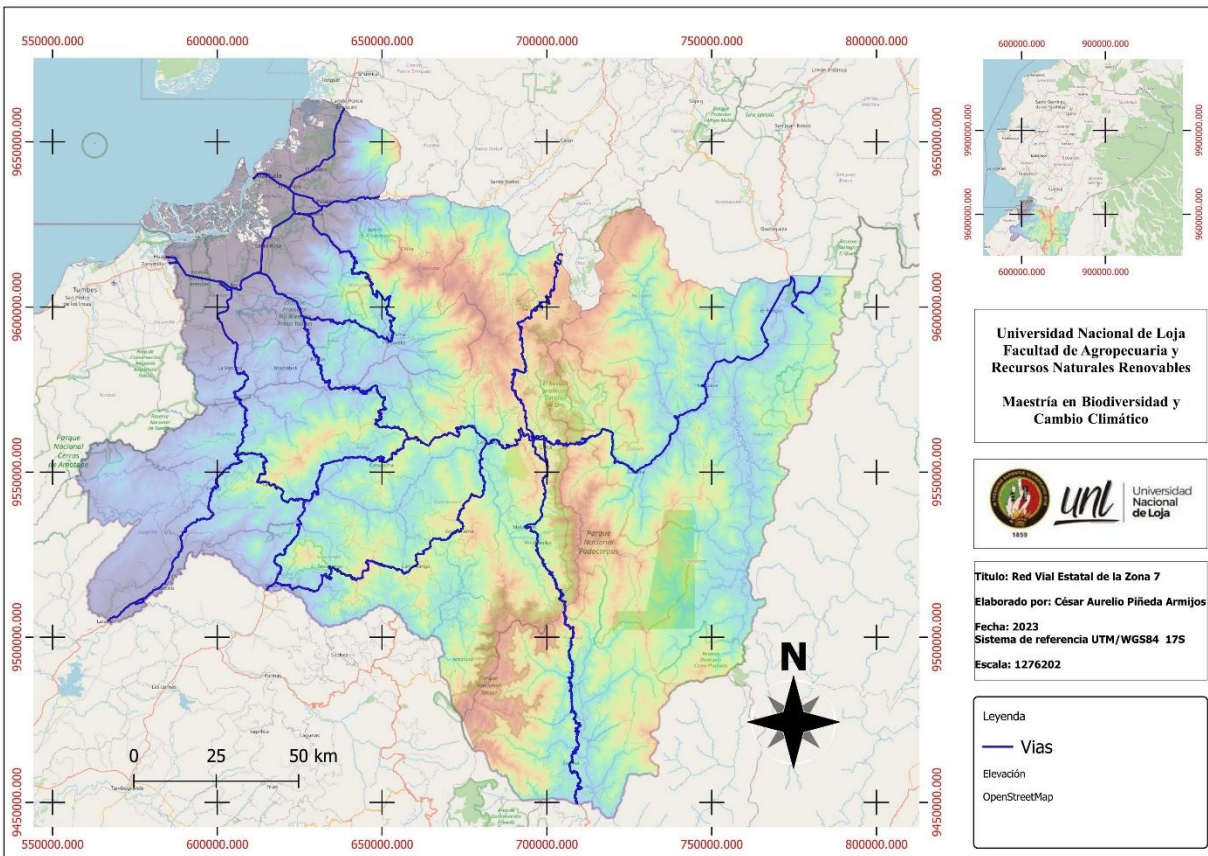


Figura 3. Ubicación de la Zona 7 en el territorio ecuatoriano y su red vial regional

Dentro de la Zona 7 se encuentra el tramo vial Loja - Catamayo de la Red Vial Estatal (RVE) E-35, que consta de 36 km y se ubica en la provincia de Loja, entre los cantones de Loja y Catamayo. El inicio del tramo vial es el redondel Isidro Ayora, ubicado junto al terminal terrestre

Reina de El Cisne en la ciudad de Loja, y el final es el redondel al llegar a la ciudad de Catamayo (Figura 4).

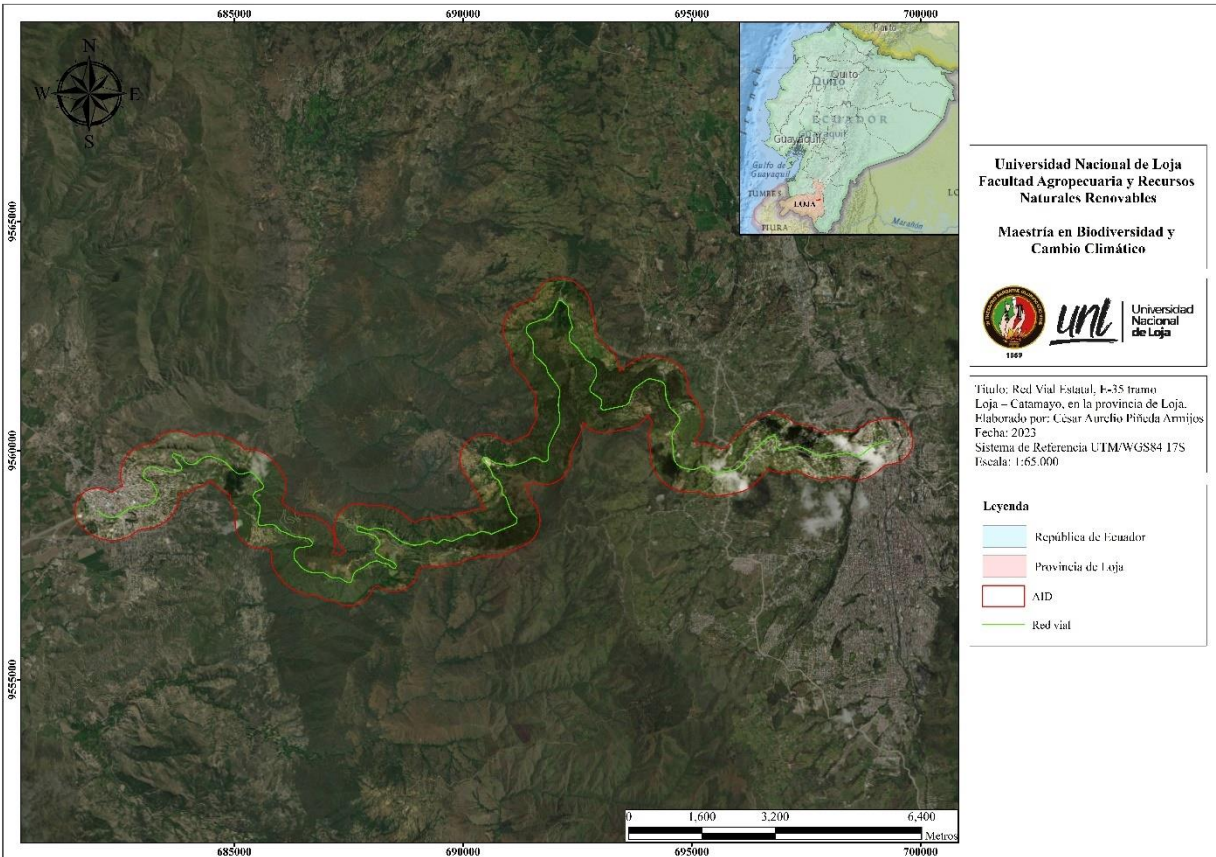


Figura 4. Red Vial Estatal, E-35 tramo Loja – Catamayo, en la provincia de Loja.

En el contexto nacional, el Ministerio de Transportes y Obras Públicas tiene la responsabilidad de construir, mantener, señalar y controlar las carreteras de la Costa, Sierra y la Amazonía, ya que se consideran parte de la red vial estatal. En la Zona de Planificación 7, el sistema actual de carreteras consta de una red de primer orden de 1 504 km, una red de segundo orden de 237 km, una red de tercer orden de 2 165 km y una red de cuarto orden de 26 117 km. Por consiguiente, la red global de carreteras del Estado en esta zona es de aproximadamente 1 504 km, con 9 carreteras arteriales que forman los principales enlaces entre la Costa y el Estado.

## **5.2 Método de estudio**

Este estudio empleó un enfoque inductivo-deductivo, analítico, utilizando una estrategia de investigación mixta que realizó un estudio de caso en el tramo Loja – Catamayo RVE E-35 en la Zona 7 de Ecuador.

## **5.3 Tipo de investigación**

Esta investigación adopta un enfoque descriptivo para comprender y explicar el surgimiento de un fenómeno mediante la comparación entre la teoría y la realidad, utilizando información recopilada (Vargas, 2009). Además, las variables se caracterizaron a través de mediciones, observaciones y criterios, reflejando su estado natural durante la inspección (Hernández et al., 2010c).

Además, la investigación tiene un elemento cuantitativo, ya que se tomó en cuenta datos cuantificables, buscando además conexiones causales que explican el objeto de investigación, midiendo el impacto de una variable sobre un fenómeno (Hernández et al., 2010a).

## **5.4 Diseño de investigación**

El proyecto adopta un enfoque integral y detallado para estudiar la vulnerabilidad de la vía Loja-Catamayo ante eventos climáticos extremos. El marco conceptual se sustenta en un paradigma positivista y una metodología cuantitativa, permitiendo la recolección y análisis objetivo de datos para generar resultados empíricamente verificables.

El alcance de la investigación es exploratorio y descriptivo simultáneamente. Mediante un abordaje exploratorio se identificarán nuevas áreas de conocimiento sobre eventos climáticos y su impacto en infraestructura vial. Asimismo, el componente descriptivo detallará vulnerabilidades específicas de la vía Loja-Catamayo ante estos eventos.

Respecto al método, se emplea un diseño no experimental transeccional en el que las variables independientes no serán manipuladas, observándose en su contexto natural (Hernández et al., 2010b). Esto implica estudiar las variables en su estado original en un momento determinado, incluyendo:

- Variables independientes: escenarios climáticos, segmentos viales.



- Variables dependientes: vulnerabilidad vial, eventos extremos esperados, daños proyectados.
- Otras variables: ubicación geográfica, indicadores socioeconómicos del área de influencia.

Las técnicas de recolección de datos, variadas y robustas, comprenden: análisis estadístico de registros climáticos históricos, modelización de variables climáticas mediante escenarios, evaluación técnica de la vía y encuestas a actores clave.

El procesamiento y análisis abarcará: análisis descriptivo de variables climáticas, pruebas de homogeneidad de datos históricos, validación de modelos climáticos globales, análisis de componentes principales de encuestas y evaluación de vulnerabilidad de segmentos viales. Un resumen lo manifestado se establece en la Tabla 1.

Tabla 1. Componentes del diseño de investigación

<b>Componente del Diseño</b>	<b>Detalle</b>
Paradigma y enfoque Alcance	Paradigma positivista, enfoque cuantitativo Exploratorio y descriptivo
Método	No experimental, transeccional
VARIABLES DE ESTUDIO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Independientes: escenarios climáticos, segmentos viales</li> <li>- Dependientes: vulnerabilidad de la vía, eventos extremos proyectados, daños esperados</li> <li>- Otras variables: ubicación geográfica, datos socioeconómicos del área de influencia</li> <li>- Análisis estadístico de registros climáticos históricos</li> </ul>
Técnicas de recolección de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelación y proyección de variables climáticas mediante escenarios globales</li> <li>- Evaluación técnica de la infraestructura vial</li> <li>- Encuesta a actores locales</li> <li>- Análisis descriptivo de variables climáticas</li> <li>- Aplicación de pruebas de homogeneidad a datos climáticos históricos</li> </ul>
Procesamiento y análisis de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Validación de modelos climáticos globales mediante diagrama de Taylor</li> <li>- Análisis de componentes principales de encuestas</li> <li>- Análisis de vulnerabilidad por tramos de vía</li> </ul>

Este diseño ofrece una comprensión integral y detallada de la situación actual y futura de la vía para fundamentar decisiones informadas sobre gestión de infraestructura vial ante eventos climáticos extremos.

## **5.5 Marco metodológico**

El proceso metodológico para la evaluación de vulnerabilidad al cambio climático de la infraestructura vial en la presente investigación consistió en:

- Aplicación del marco de evaluación de vulnerabilidad de la Administración Federal de Carreteras de EE. UU. (FHWA), adaptado a los objetivos del estudio.
- Recopilación de información sobre proyecciones climáticas futuras para la zona de estudio.
- Consolidación de datos sobre infraestructura de transporte existente y cobertura terrestre.
- Análisis integrado de datos climáticos, de infraestructura y socioeconómicos.
- Identificación de áreas y elementos vulnerables.
- Priorización de estrategias de adaptación para mejorar la resiliencia.
- Reuniones con grupos focales para obtener información sobre susceptibilidad al cambio climático y enfocar la recolección de datos.

La metodología aplicada, basada en el marco de FHWA, el análisis integral de datos y el involucramiento de actores clave, proporcionó un enfoque sistemático para evaluar la vulnerabilidad climática de la infraestructura vial (Ver Figura 5), lo cual puede ser de utilidad en otros contextos.



Figura 5. Marco metodológico para la vulnerabilidad de infraestructura vial.

## 5.6 Determinar las condiciones climáticas actuales de precipitación y temperatura sobre la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja - Catamayo.

### 5.6.1 Base de datos de clima

Se utilizó el software RStudio para la obtención y procesamiento de los datos climáticos mensuales. La selección de estaciones meteorológicas se realizó aplicando dos criterios principales: completitud de datos superior al 85 % en el período 1 981-2 010 y disponibilidad de series concurrentes para las variables de precipitación, temperatura media, máxima y mínima. En total, se consideraron:

- Diecinueve estaciones para precipitación, entre ellas: M0033 La Argelia-Loja, M0142 Saraguro, M0143 Malacatos, M0146 Cariamanga, M0147 Yangana. El resto de los códigos se detallan en nota al pie<sup>4</sup>.
- Cuatro estaciones para temperatura media, siendo: M0033 La Argelia-Loja, M0142 Saraguro, M0146 Cariamanga, M0180 Zaruma.
- Cinco estaciones para temperatura máxima, entre ellas: M0033 La Argelia-Loja, M0142 Saraguro, M0143 Malacatos, M0146 Cariamanga, M0147 Yangana.
- Tres estaciones para temperatura mínima, como: M0033 La Argelia-Loja, M0142 Saraguro, M0146 Cariamanga.

La completitud de los datos mensuales se evaluó identificando meses faltantes mediante series de tiempo. El umbral del 85 % buscó asegurar confiabilidad, por encima del 80 % recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Se detectaron valores atípicos en los datos utilizando diagramas de caja (boxplots) y la prueba de Grubbs. Los datos faltantes se imputaron probando métodos como pmm (Emparejamiento de la Media Predictiva), norm (Normal), rf (Bosque Aleatorio) y mean (Media); se seleccionó el método con menor error cuadrático medio, ya que proporciona una medida numérica del error promedio de las estimaciones de precipitación y temperatura generadas por cada método de imputación en comparación con los datos reales, permitiendo seleccionar el método más preciso.

Para evaluar la homogeneidad de las series mensuales de las variables climáticas, se aplicaron pruebas como Pettitt para cambios en la mediana, Buishand y SNHT para cambios en la media, y Von Neumann para consistencia de la varianza. Valores p menores a 0,05 indicaron presencia de cambios significativos.

Se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo de los datos mensuales, calculando estadísticos como media, mediana, cuartiles, entre otros. La precipitación se interpoló espacialmente mediante la técnica de Ponderación Inversa a la Distancia (IDW, por sus siglas en inglés), generando mapas de rasters. Para las temperaturas, se utilizó el método de Kriging, que es una interpolación más compleja que IDW, pero proporciona estimaciones generalmente más precisas y confiables, especialmente cuando existe una tendencia espacial fuerte en los datos. El

---

<sup>4</sup> M0148 Celica, M0149 Gonzanamá, M0150 Amaluza Inamhi, M0432 San Lucas Inamhi, M0434 Sozoranga Inamhi, M0435 Alamor, M0437 Saucillo (Alamor En), M0438 Jimbura, M0439 Sabiango Inamhi, M0502 El Pangui, M0515 Catacocha, M0543 Cajanuma, M0544 Colaisaca, M0765 Sabanilla-Predeur Cajanuma Colaisaca Sabanilla-Predeur

Kriging es ampliamente utilizado en geología, minería, medio ambiente, climatología y muchos otros campos. Las interpolaciones mencionadas analizaron la distribución espacial de las variables en la zona de estudio.

### **5.6.2 Tasas de retorno**

A partir de las series mensuales completas de precipitación en 1 981-2 010, se analizaron las frecuencias de los valores máximos mensuales. Se probaron distribuciones de probabilidad como Gumbel, Gamma y Weibull para modelar eventos extremos.

El estudio se enfocó en la selección de la distribución óptima para un conjunto de datos relacionados con la precipitación. Para lograrlo, se emplearon pruebas de bondad de ajuste, que son herramientas estadísticas diseñadas para evaluar la adecuación de los modelos de distribución de probabilidad a los datos observados. Entre las pruebas aplicadas, se incluyó el test de Kolmogorov-Smirnov, que compara la distribución acumulativa de los datos con la esperada bajo una distribución teórica, permitiendo determinar si ambas distribuciones pueden ser consideradas equivalentes.

Se utilizaron el Criterio de Información de Akaike (AIC) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC), que buscan equilibrar la complejidad del modelo frente a la calidad del ajuste, penalizando el exceso de parámetros para evitar el sobre ajuste. El AIC se centra en la información perdida al usar un modelo para representar la realidad, mientras que el BIC incorpora el tamaño de la muestra en su penalización.

La combinación de estas pruebas y criterios proporcionó un enfoque robusto para la selección del modelo más adecuado. A través de este proceso meticuloso, se identificó la distribución que mejor se ajustaba a los datos de precipitación, asegurando que las inferencias y predicciones subsecuentes se basaran en la representación más precisa de la variabilidad observada.

Se estimaron períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años para eventos extremos de lluvia, representados por los máximos anuales de precipitación, en cada estación. Mediante interpolación IDW, se generaron mapas de estos máximos anuales mensuales para los distintos períodos de retorno. Esto caracterizó el régimen de eventos extremos actual en la zona de interés.

### 5.6.3 *Cambio climático*

Se obtuvieron proyecciones climáticas de modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6, por sus siglas en inglés) en la plataforma NEX-GDDP de la NASA para los escenarios SSP370 y SSP585. El período histórico considerado fue 1 980-2 010, y los períodos futuros analizados fueron 2 015-2 045 y 2 046-2 075. Se validaron los Modelos Climáticos Globales (MCGs) utilizando el método de Taylor, el cual es una herramienta gráfica y estadística que permite evaluar y comparar el desempeño de diferentes modelos climáticos o de predicción en relación con un conjunto de datos de referencia u observaciones.

El método de Taylor consiste en representar gráficamente la relación entre la desviación estándar normalizada y la correlación de los patrones espaciales de un modelo climático con respecto a los datos observados. Esto permite identificar de manera visual qué modelo se ajusta mejor a las observaciones, considerando tanto la variabilidad como la correlación espacial.

Posteriormente, se aplicó el método delta-change o "cambio delta", que es un enfoque utilizado para generar proyecciones climáticas a partir de modelos climáticos globales. Este método consiste en perturbar los datos históricos de precipitación y temperatura según los factores de cambio proyectados por el Modelo de Circulación General (MCG) seleccionado previamente. Específicamente, se calcularon las diferencias (deltas) entre los valores futuros proyectados por el MCG y los valores históricos del mismo modelo para cada variable climática. Estas deltas se sumaron o restaron (según corresponda) a los datos observados históricos, generando así series de tiempo futuras ajustadas según las proyecciones del MCG.

Este procedimiento permitió estimar registros climáticos futuros para la zona de estudio, considerando los efectos del cambio climático proyectado por el MCG seleccionado. Estos registros futuros se utilizaron para evaluar la amenaza de eventos extremos de precipitación y temperatura en la zona de interés, bajo los escenarios de cambio climático analizados. El flujograma del procedimiento metodológico ejecutado se presenta en la Figura 6, dividido en etapas para una mejor comprensión.

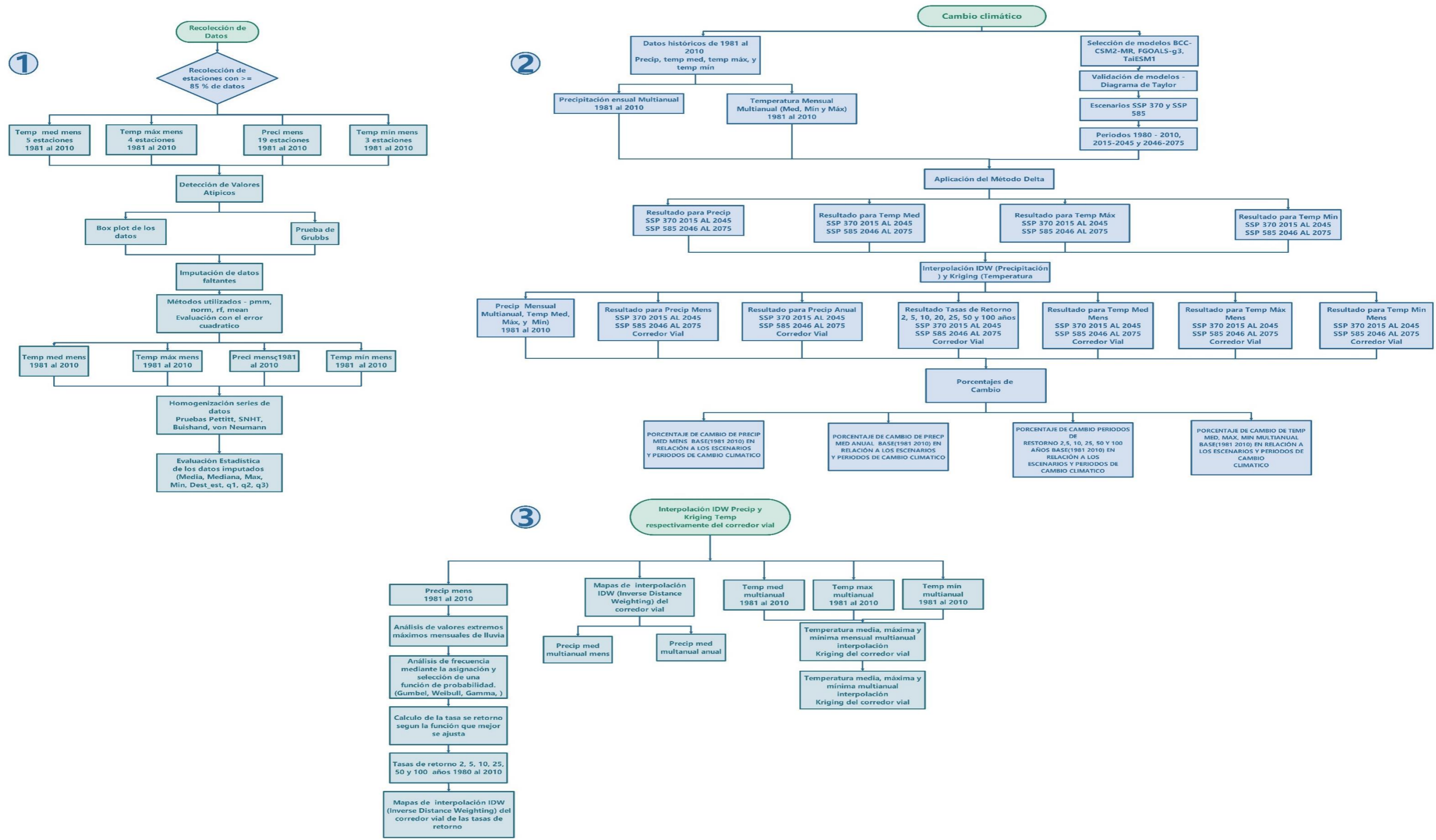


Figura 6. Flujograma del procedimiento metodológico del primer objetivo.

## **5.7 Evaluación de la vulnerabilidad actual y futura, período 1981 - 2075 de la Red Vial Estatal RVE E - 35, tramo Loja - Catamayo, en un contexto de cambio climático para una comprensión adecuada en la gestión y desarrollo infraestructura vial sostenible.**

La evaluación de la vulnerabilidad climática de la Red Vial Estatal E-35, tramo Loja-Catamayo, se llevó a cabo para los períodos actuales (2015-2045) y futuro (2046-2075), mediante un enfoque metodológico sistemático. Este consistió en la aplicación de indicadores cuantitativos y cualitativos para los elementos que componen la vulnerabilidad: exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa. La metodología desarrollada permitió realizar una caracterización integral de los factores de vulnerabilidad a lo largo del tramo vial, identificando las áreas y activos críticos. A continuación, se describen los pasos seguidos en la evaluación de la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa mediante el uso de indicadores específicos para cada componente. Los resultados de esta evaluación sirvieron de base para determinar los niveles de vulnerabilidad en diferentes segmentos del corredor vial ante amenazas climáticas como precipitaciones intensas, deslizamientos e inundaciones.

### ***5.7.1 Metodología para evaluar la vulnerabilidad***

Se realizó una evaluación de la vulnerabilidad climática basada en indicadores para los elementos de exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa. Los indicadores se obtuvieron a partir de la información existente y vinculada a la metodología, incluyendo datos climáticos, características de la infraestructura vial, factores socioeconómicos y capacidades institucionales.

Para la exposición, se analizaron indicadores como altitud, cambio de temperatura (media anual, media máxima anual y media mínima anual), clima, uso de suelo y cambio de precipitación anual. En cuanto a la sensibilidad, los indicadores incluyeron tipo de suelo, pendiente, cobertura vegetal, uso de suelo, capacidad de drenaje, ubicación geográfica, deslizamientos y erosión. Finalmente, para la capacidad adaptativa al cambio climático, se consideraron planes de adaptación, tecnologías innovadoras, recursos financieros, participación y coordinación, capacidades técnicas humanas, infraestructura de alerta temprana, respaldo institucional, mantenimiento adecuado y flexibilidad adaptativa.



Cada indicador recibió un puntaje de 1 a 4, donde 1 representa un nivel bajo y 4 un nivel alto. El puntaje 1 indica una condición favorable, mientras que el puntaje 4 indica una condición desfavorable o de mayor riesgo. Por ejemplo, para un indicador de exposición a inundaciones, un puntaje de 1 se asignaría a una sección de carretera ubicada en una zona de bajo riesgo, mientras que un puntaje de 4 se asignaría a una sección en una zona altamente propensa a inundaciones.

Los rangos de valores para la exposición, sensibilidad, capacidad adaptativa y vulnerabilidad se establecieron de la siguiente manera:

Para la exposición:

- Alta exposición: 3 a 4
- Media exposición: 2 a 2,9
- Baja exposición: 0 a 1,9

Para la sensibilidad:

- Alta sensibilidad: 3 a 4
- Media sensibilidad: 2 a 2,9
- Baja sensibilidad: 0 a 1,9

Para la capacidad adaptativa al cambio climático:

- Alta capacidad adaptativa: 3 a 4
- Media capacidad adaptativa: 2 a 2,9
- Baja capacidad adaptativa: 0 a 1,9

Para la vulnerabilidad:

- Alta vulnerabilidad: 3 a 4
- Media vulnerabilidad: 2 a 2,9
- Baja vulnerabilidad: 0 a 1,9

Posteriormente, se calculó un puntaje de vulnerabilidad ponderando los tres elementos: exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa. Este puntaje permitió clasificar los tramos en alta, media o baja vulnerabilidad.

La Figura 7 ilustra el enfoque metodológico utilizado, detallando los indicadores y factores analizados para cada componente de la vulnerabilidad.

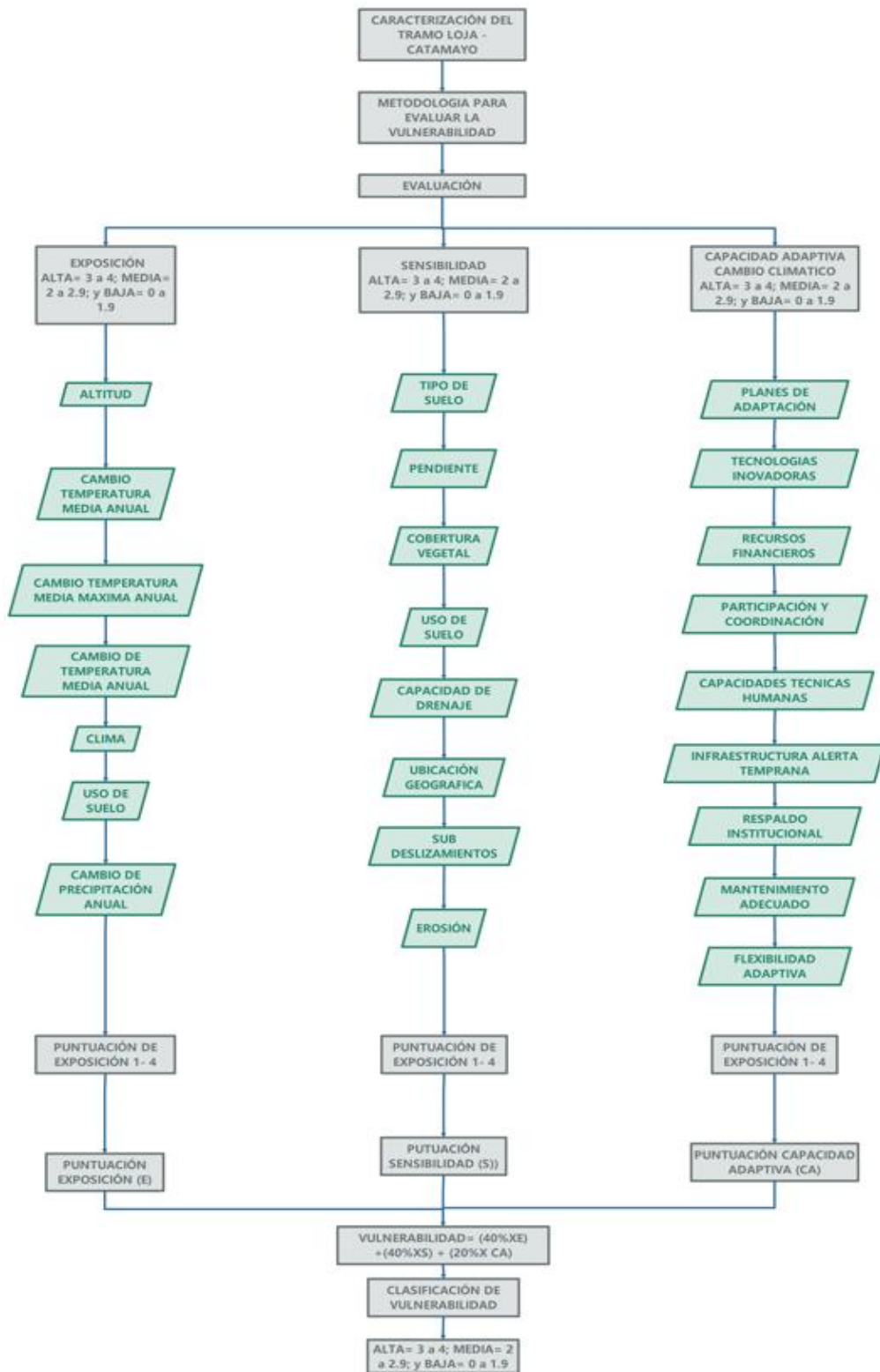


Figura 7. Flujograma del proceso metodológico para establecer la Vulnerabilidad al cambio climático de la Red Vial Estatal, E-35 tramo Loja – Catamayo, en la provincia de Loja.

### 5.7.2 Evaluación de la exposición

Se evaluó la exposición a temperatura y precipitación con indicadores derivados de proyecciones climáticas (Tabla 2).

Tabla 2. Indicadores para evaluar exposición.

Categoría	Indicador	Descripción	Valoración
Exposición	Altitud	La altura de la carretera sobre el nivel del mar.	Baja: < 1 000 m; Media: 1 000 – 2 000 m; Alta: > 2 000 m
Exposición	Cambio en la temperatura media anual	La temperatura media total a lo largo de un año concreto varía de un lugar a otro.	Baja: < 0,5 °C; Media: 0,5 - 1,0 °C; Alta: > 1,0 °C
Exposición	Cambio en la temperatura media máxima anual	La temperatura media máxima total a lo largo de un año concreto varía de un lugar a otro.	Baja: < 0,5 °C; Media: 0,5 - 1,0 °C; Alta: > 1,0 °C
Exposición	Cambio en la temperatura media mínima anual	La temperatura media mínima total a lo largo de un año concreto varía de un lugar a otro.	Baja: < 0,5 °C; Media: 0,5 - 1,0 °C; Alta: > 1,0 °C
Exposición	Cambio en la cantidad de lluvia anual	Cambios en la cantidad de precipitación durante una duración determinada.	Baja: < 10 %; Media: 10 – 20 %; Alta: > 20 %
Exposición	Clima	La incidencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, incluidas las inundaciones y las sequías.	Baja: < 10 %; Media: 10 – 20 %; Alta: > 20 %
Exposición	Uso del suelo	Tipos de utilización del suelo alrededor del tramo de carretera, como bosques, agricultura o desarrollo urbano.	Baja: Rural; Media: Semiurbano; Alta: Urbano

Nota: Base metodológica del estudio de Hyman et al. (2014) sobre el *Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase 2: Task 3.1: Screening for Vulnerability*.

Se asignó un puntaje de exposición de 1 a 4 a cada activo según los valores de los indicadores. Esto caracterizó su exposición diferenciada ante factores como altas temperaturas o eventos extremos.

### 5.7.3 Evaluación de la sensibilidad

Se construyeron indicadores de sensibilidad ajustados a cada activo y estresor (Tabla 3). Se asignó un puntaje de exposición de 1 a 4 a cada activo según los valores de los indicadores.

Tabla 3. Indicadores utilizados para evaluar la sensibilidad.

<b>Categoría</b>	<b>Indicador</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valoración</b>
<b>Sensibilidad</b>	Tipo de suelo	La composición del suelo y sus atributos pueden hacer que sea vulnerable a los cambios climáticos extremos.	Bajo: terreno estable que resiste los cambios en el nivel de humedad y lluvia. Medio: terrenos que pueden soportar algunos corrimientos de tierra y erosión. Alta: terrenos con una gran sensibilidad a las transformaciones climáticas.
<b>Sensibilidad</b>	Pendiente del terreno	Ángulo del suelo respecto a la superficie plana.	Baja: terreno plano o con pendiente suave. Media: terreno con pendiente moderada. Alta: terreno con pendiente abrupta o escarpada.
<b>Sensibilidad</b>	Cobertura vegetal	El tipo y la cantidad de vegetación que cubre la zona.	Baja: cobertura vegetal densa y diversa. Media: cobertura vegetal moderada, con algunas áreas desprovistas de vegetación. Alta: escasa cobertura vegetal, con zonas expuestas a la erosión y la desertificación.
<b>Sensibilidad</b>	Uso del suelo	El tipo de cosas que hace la gente en la zona.	Baja: uso del suelo compatible con la conservación del ecosistema y la biodiversidad. Media: uso del suelo mixto, con zonas agrícolas y forestales. Alta: uso del suelo intensivo, con actividades económicas que generan un alto impacto ambiental.

<b>Categoría</b>	<b>Indicador</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valoración</b>
<b>Sensibilidad</b>	Capacidad de drenaje	La capacidad del suelo para retener y desprender agua.	<p>Baja: suelo con alta capacidad de retener agua, lo que aumenta el riesgo de deslizamientos e inundaciones.</p> <p>Media: suelo con capacidad de drenaje moderada, que permite el paso del agua sin generar problemas de erosión.</p> <p>Alta: suelo con baja capacidad de retener agua, lo que favorece la erosión y la pérdida de nutrientes.</p>
<b>Sensibilidad</b>	Ubicación geográfica	Posicionamiento de la carretera ante fenómenos meteorológicos violentos.	<p>Baja: carretera ubicada en una zona con baja incidencia de eventos climáticos extremos.</p> <p>Media: carretera ubicada en una zona con cierta incidencia de eventos climáticos extremos.</p> <p>Alta: carretera ubicada en una zona con alta incidencia de eventos climáticos extremos.</p>
<b>Sensibilidad</b>	Deslizamientos	Posicionamiento de la carretera con respecto a áreas propensas a deslizamientos.	<p>Baja: Carretera ubicada en una zona con baja incidencia de deslizamientos, generalmente áreas planas o con una leve inclinación y con una cobertura vegetal densa que estabiliza el suelo.</p> <p>Media: Carretera ubicada en una zona con cierta incidencia de deslizamientos, como áreas con inclinaciones moderadas, zonas donde la vegetación ha sido alterada pero no eliminada, o áreas con historial de deslizamientos menores.</p> <p>Alta: Carretera ubicada en una zona con alta incidencia de deslizamientos, como áreas con inclinaciones pronunciadas, zonas deforestadas, áreas con historial de deslizamientos mayores, o zonas con</p>

Categoría	Indicador	Descripción	Valoración
			suelos inestables y saturados.
<b>Sensibilidad</b>	Erosión del suelo	La erosión de la capa superficial del suelo y de los nutrientes por la lluvia y el viento.	Baja: pérdida de suelo y nutrientes mínima. Media: pérdida de suelo y nutrientes moderada, con algunos procesos de erosión activos. Alta: pérdida de suelo y nutrientes significativa

Fuente: Base metodológica del estudio de Hyman et al., (2014) sobre el *Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase 2: Task 3.1: Screening for Vulnerability*.

En el tramo Loja-Catamayo E - 35 se evaluaron puentes y carreteras. Esto identificó áreas más sensibles ante deslizamientos, inundaciones u otros impactos.

#### 5.7.4 Capacidad adaptativa de las carreteras

Se utilizaron indicadores sobre planes de adaptación, recursos, coordinación y otros (Tabla 4) para evaluar la capacidad adaptativa. Se asignó un puntaje de exposición de 1 a 4 a cada activo según los valores de los indicadores.

Tabla 4. Indicadores utilizados para evaluar la capacidad de adaptación de las carreteras

Categoría	Indicador	Descripción	Valoración
Capacidad Adaptativa	Planes de adaptación	La presencia de estrategias oficiales para adaptar las carreteras a los efectos del cambio climático.	Baja: no existen planes formales; Media: existen planes, pero no están actualizados o no se implementan adecuadamente; Alta: existen planes actualizados y se implementan adecuadamente
Capacidad Adaptativa	Tecnologías prácticas innovadoras	Utilizar métodos y tecnología mejorados para aumentar la resistencia y robustez de las carreteras frente a las inclemencias meteorológicas.	Baja: no se utilizan tecnologías ni prácticas innovadoras; Media: se utilizan, pero en forma limitada; Alta: se utilizan tecnologías y prácticas innovadoras de manera efectiva
Capacidad Adaptativa	Recursos financieros	Acceso a los recursos neCésarios para ejecutar soluciones que aborden el cambio climático.	Baja: falta de recursos financieros; Media: recursos financieros limitados; Alta: recursos financieros adecuados y bien gestionados

Categoría	Indicador	Descripción	Valoración
Capacidad Adaptativa	Participación y coordinación	El nivel de participación y colaboración entre los afectados por la gestión y las alteraciones de la carretera.	Baja: falta de participación y coordinación; Media: participación y coordinación limitadas; Alta: participación y coordinación efectiva y activa
Capacidad Adaptativa	Capacidades técnicas y humanas	La capacidad de conservar y modificar adecuadamente las carreteras para las condiciones climáticas actuales y potenciales requiere experiencia y esfuerzo.	Baja: falta de capacidades técnicas y humanas; Media: capacidades técnicas y humanas limitadas; Alta: capacidades técnicas y humanas adecuadas y bien gestionadas
Capacidad Adaptativa	Infraestructura de alerta temprana	La presencia de alertas ante imprevistos meteorológicos que puedan afectar a las carreteras.	Baja: no existen sistemas de alerta temprana; Media: existen sistemas, pero son limitados o no están actualizados; Alta: existen sistemas actualizados y bien gestionados
Capacidad Adaptativa	Respaldo institucional	El nivel de apoyo que los órganos gubernamentales y políticos prestan a la adaptación al cambio climático en el contexto de la gestión de las carreteras.	Baja: falta de respaldo institucional y político; Media: respaldo institucional y político limitado; Alta: respaldo institucional y político efectivo y activo
Capacidad Adaptativa	Mantenimiento adecuado	Proporcionar un nivel adecuado de mantenimiento de la carretera para garantizar su supervivencia en condiciones meteorológicas adversas.	Baja: falta de mantenimiento adecuado; Media: mantenimiento limitado o deficiente; Alta: mantenimiento adecuado y bien gestionado
Capacidad Adaptativa	Flexibilidad y adaptabilidad	La capacidad y maleabilidad de la gestión de las carreteras para adaptarse a condiciones meteorológicas imprevistas.	Baja: falta de flexibilidad y adaptabilidad; Media: flexibilidad y adaptabilidad limitadas; Alta: flexibilidad

Nota: Base metodológica del estudio de Hyman et al. (2014) sobre el *Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase 2: Task 3.1: Screening for Vulnerability*.

Esto detectó áreas críticas para fortalecer y aumentar la resiliencia climática de la infraestructura.

## **5.8 Elaboración de la propuesta de adaptación al cambio climático para la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja - Catamayo, a través de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.**

El presente estudio se enfocó en la identificación de soluciones viables para la adaptación al cambio climático en la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja-Catamayo, con el objetivo de generar una propuesta concreta a través de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras

Públicas del Ecuador. Se estableció un alcance temporal y se asignaron los recursos necesarios para garantizar la adecuada ejecución del estudio.

La población objeto de estudio estuvo compuesta por los técnicos de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Debido a su conocimiento especializado y directo involucramiento en la gestión y mantenimiento de la infraestructura vial afectada por el cambio climático, se optó por una muestra censal, abarcando la totalidad del grupo objetivo.

Se diseñó una encuesta semiestructurada, compuesta por 15 preguntas abiertas y cerradas, con el fin de explorar en profundidad las opiniones, experiencias y sugerencias de los técnicos sobre estrategias de adaptación al cambio climático. Las preguntas fueron elaboradas con claridad, concisión y especificidad para minimizar ambigüedades y estimular respuestas detalladas y significativas (Ver Anexo 1).

La encuesta se distribuyó mediante Google Forms, facilitando el acceso y la participación de los técnicos. Además, se promovió la participación a través de comunicaciones directas y seguimiento por WhatsApp. El cuestionario fue enviado a todos los técnicos pertenecientes a la Subsecretaría Zonal 7, estableciendo un plazo para la respuesta y ofreciendo asistencia para cualquier duda o problema relacionado con la encuesta.

El análisis de la información recogida se realizó utilizando herramientas estadísticas avanzadas. Inicialmente, se empleó Excel para organizar los datos y calcular frecuencias y porcentajes. Posteriormente, se profundizó en el análisis mediante el uso de R para llevar a cabo un Análisis de Componentes Principales (ACP), identificando patrones y relaciones subyacentes entre las variables.

Con los datos y análisis obtenidos, se desarrolló una propuesta detallada para la adaptación al cambio climático de la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja-Catamayo. La propuesta se basó en los hallazgos clave y reflejó las sugerencias y recomendaciones de los técnicos. Se siguieron principios de planificación estratégica y se empleó un enfoque de marco lógico para estructurar la propuesta, definir objetivos claros, establecer indicadores medibles y considerar los posibles riesgos y supuestos. El proceso metodológico desarrollado se describe en la Figura 8.



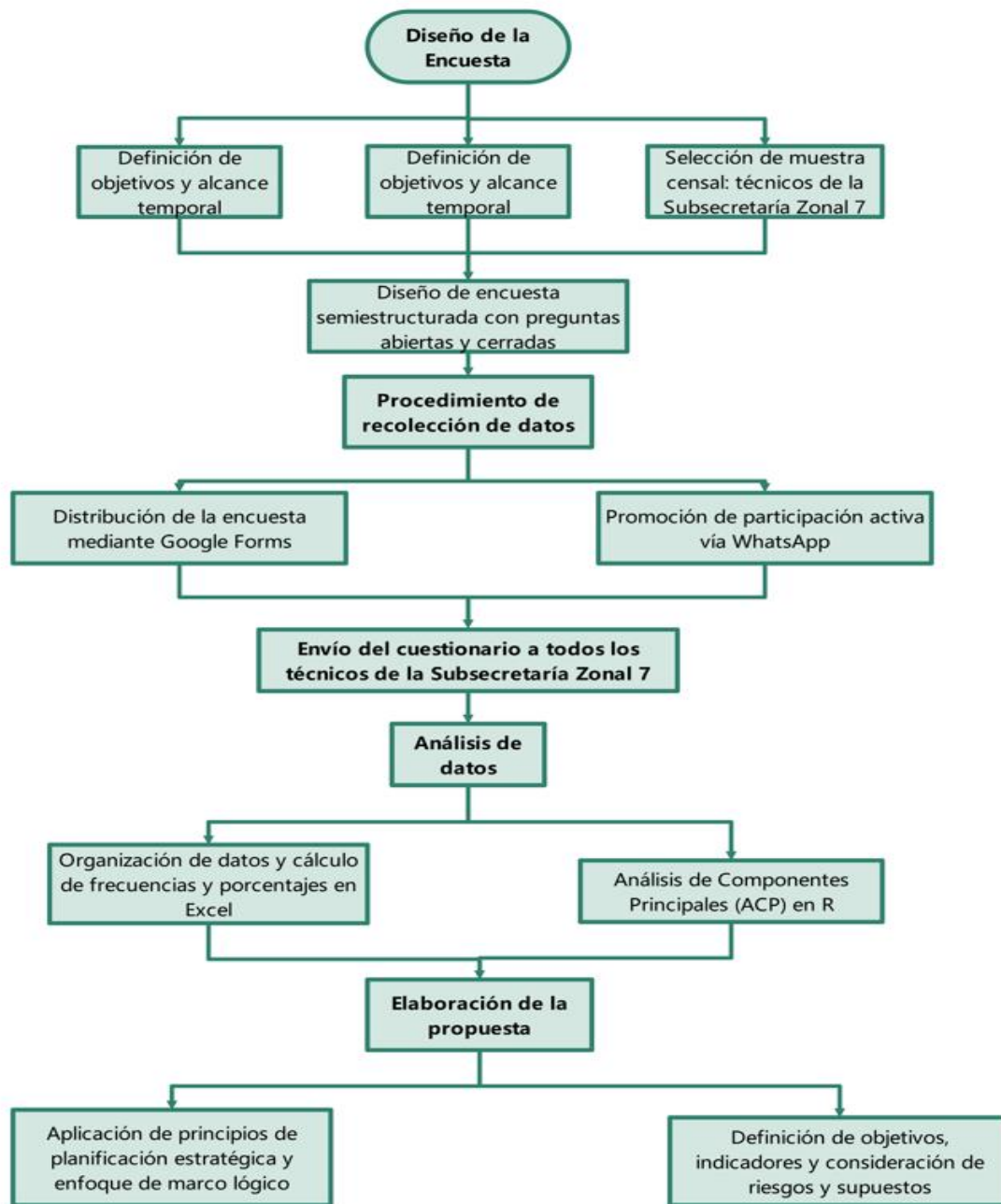


Figura 8. Proceso metodológico utilizado para el desarrollo de la encuesta semiestructurada.

## **6 Resultados.**

Esta investigación ha identificado la vulnerabilidad del sistema de transporte en el Tramo E-35 de la RVE Loja - Catamayo como Alta, Media y Baja. A pesar de que la metodología hace inviable crear una comparación exacta entre cada tramo o estresor, estas clasificaciones, junto con la comprensión de las condiciones locales, permiten comprender las principales vulnerabilidades.

En la narrativa menos extrema, tres segmentos de carreteras se ubicaron dentro de los 10 segmentos más vulnerables para los cinco factores estresantes climáticos. En la narrativa más extrema, ningún segmento de carretera obtuvo una puntuación dentro del top 10 de todos los factores estresantes, pero cinco obtuvieron una puntuación dentro del top 10 para cuatro de los factores estresantes climáticos.

### **6.1 Condiciones climáticas actuales de precipitación y temperatura sobre la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja -- Catamayo.**

El análisis estadístico de las series de datos climáticos disponibles para la zona de la RVE E-35 resultó fundamental para caracterizar el comportamiento histórico de variables como la precipitación y la temperatura. Mediante la aplicación de pruebas de homogeneidad, detección de valores atípicos y análisis descriptivos en las estaciones meteorológicas con datos más completos en el período 1981-2010, fue posible examinar la consistencia, variabilidad y distribución de estos parámetros.

#### **6.1.1 Valores atípicos**

Se evidenciaron meses y estaciones con mayor presencia de valores atípicos para la precipitación, así como fluctuaciones entre estaciones para las temperaturas medias, máximas y mínimas. Estos resultados sentaron las bases para la posterior modelización climática en la región, al permitir seleccionar series de datos confiables y representativas de las condiciones locales. A continuación, se presenta el detalle del análisis estadístico realizado para las variables de precipitación media mensual multianual y temperaturas medias, máximas y mínimas multianuales en la zona de la RVE E-35.

### 6.1.1.1 Precipitación media

La evaluación de la integridad de los datos recopilados por las estaciones meteorológicas en la provincia de Loja reveló un índice de ausencia del 15 % en los registros mensuales. Este análisis permitió identificar un subconjunto de 19 estaciones meteorológicas que presentaron registros relativamente completos durante el período comprendido entre 1 981 y 2 010. La ubicación de estas estaciones seleccionadas, que se han tomado en cuenta para los cálculos de precipitación, temperatura media, máxima y mínima, se detalla en la Figura 9.

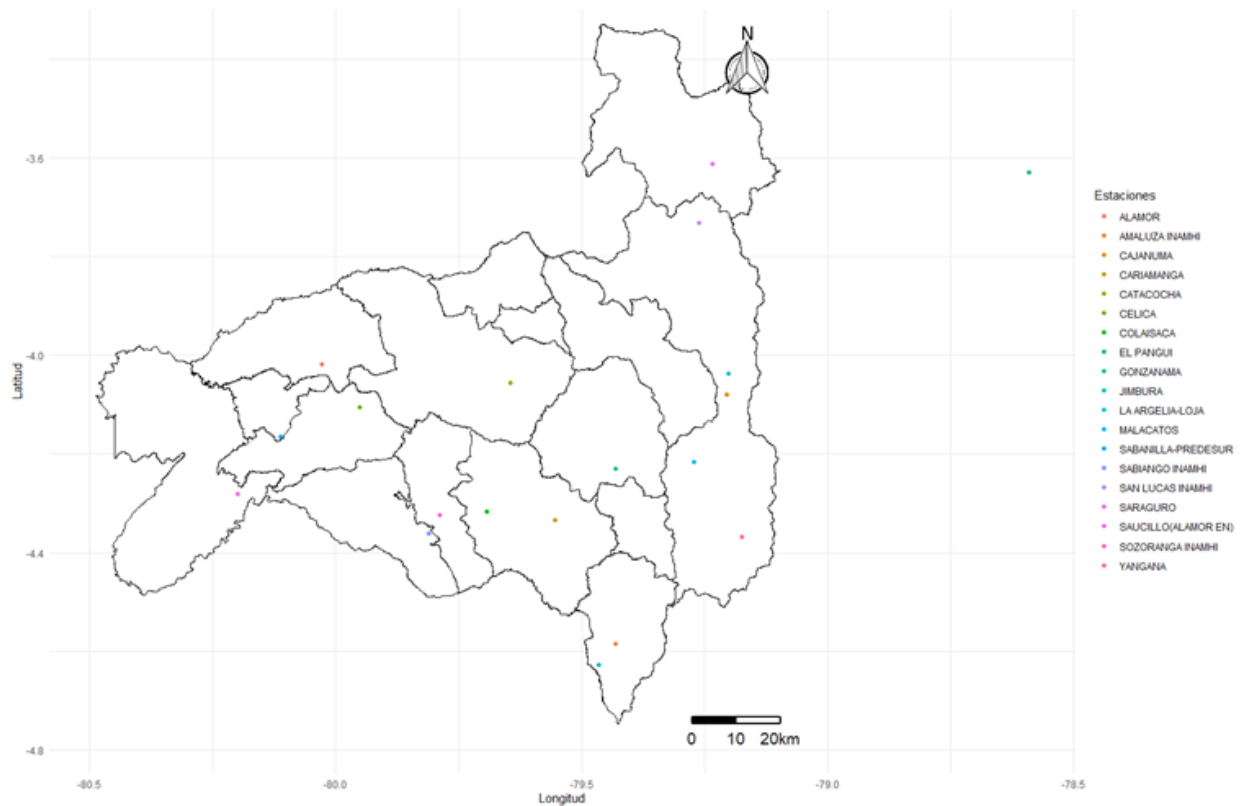


Figura 9. Ubicación de Estaciones Meteorológicas seleccionadas para análisis de precipitación y temperaturas (media, máxima y mínima) en la Provincia de Loja, 1 981-2 010.

Utilizando los datos acumulados de estas 19 estaciones, se procedió a realizar un análisis estadístico cuyos resultados se presentan a continuación:

Se identificaron un total de 327 valores atípicos en los datos analizados, resaltando la ocurrencia de eventos de precipitación inusuales en la provincia. Específicamente, las estaciones

de Saucillo, Sabanilla, Celica, Sabiango, Alamor, Jimbura, Sozoranga presentaron la mayor cantidad de valores inusuales, con 38, 28, 26, 25, 23, 23, y 23 respectivamente, por lo que se destacan como zonas particularmente propensas a lluvias atípicas (Figura 10).

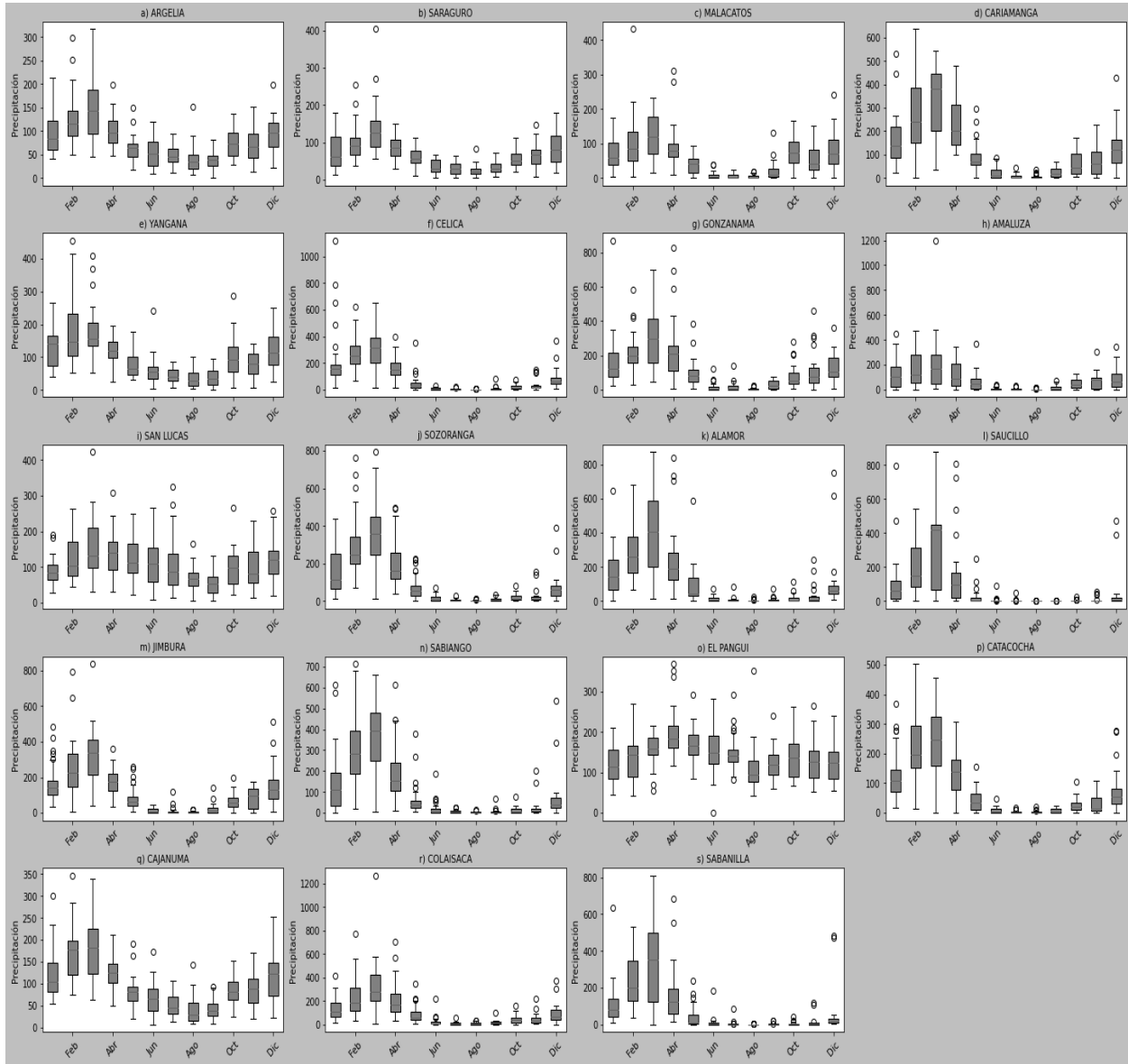


Figura 10. Distribución de la precipitación mensual por estación y visualización de valores atípicos.

Al examinar la distribución mensual de estos valores atípicos (Figura 10), los meses de marzo, abril y febrero concentraron la mayor cantidad, con 92, 82 y 71 valores atípicos correspondientemente. Esta tendencia está alineada con el período de máxima precipitación en la

región que va de diciembre a marzo. Por el contrario, estaciones como El Pangui y Colaisaca mostraron menos valores extremos, denotando un comportamiento más estable.

Se ha llevado a cabo un análisis detallado de las condiciones de precipitación basado en los registros históricos de las estaciones meteorológicas en el período de 1981 a 2010 (Figura 11) Los resultados de este estudio son fundamentales para evaluar la vulnerabilidad y fortalecer la resiliencia de la infraestructura vial ante el cambio climático.

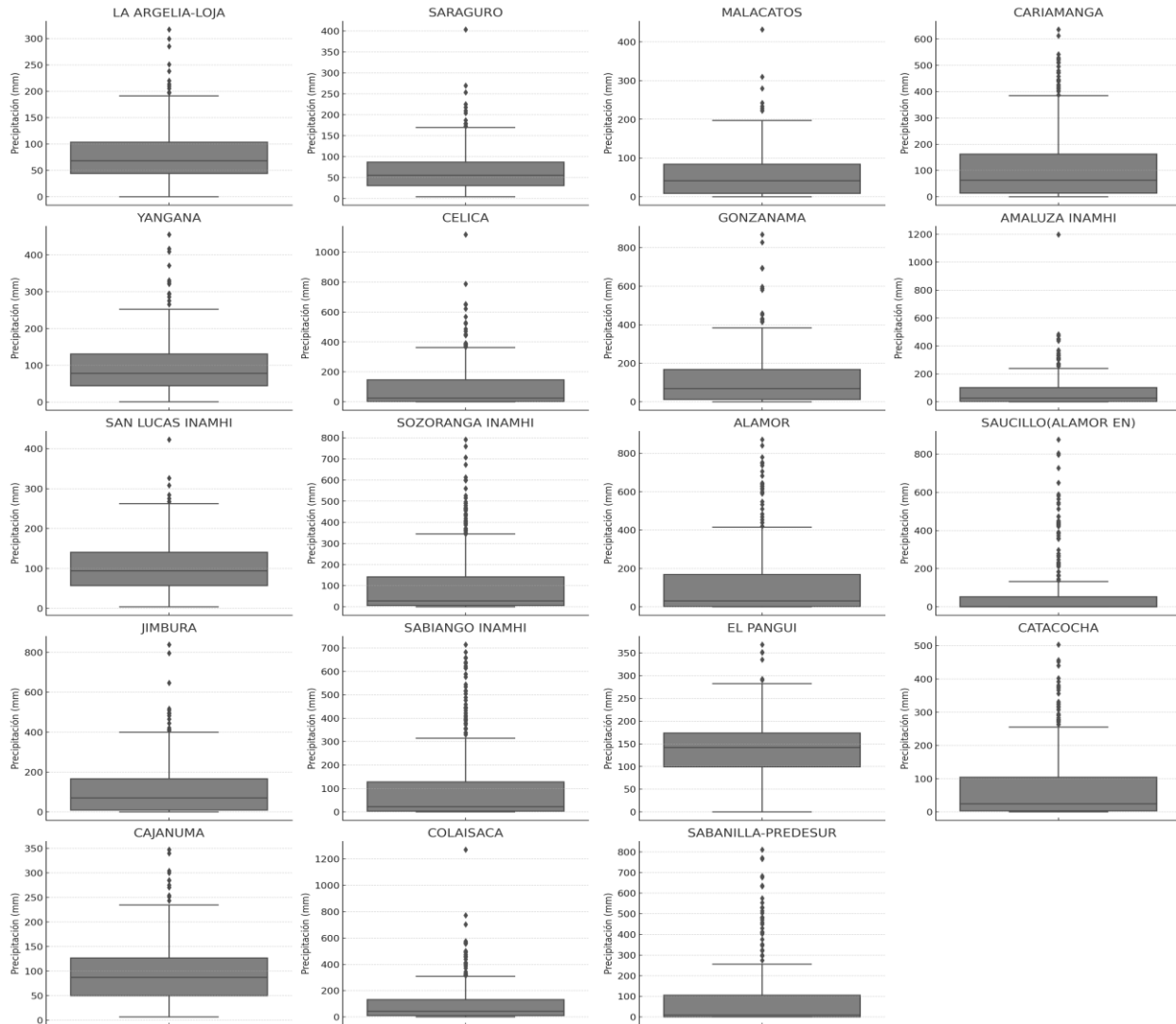


Figura 11. Distribución de Precipitación Mensual en las 19 estaciones.

Los resultados obtenidos se han clasificado en tres grupos principales de estaciones precipitaciones: las Estaciones consistentes, Estaciones con variabilidad moderada y las Estaciones con alta variabilidad y eventos extremos que se describen a continuación:

- Las estaciones con precipitaciones consistentes y predecibles la comprenden La Argelia-Loja, Saraguro y Cajanuma, estas se destacan por sus precipitaciones regulares. Se observan medianas de precipitación entre 100-150 mm, lo que indica un nivel de lluvia moderado a lo largo del año. La variabilidad es baja a moderada, reflejando una consistencia en los patrones de lluvia, con pocos o ningún valor atípico que superen los 400 mm. Este comportamiento es indicativo de un menor riesgo de eventos climáticos disruptivos que podrían afectar adversamente la red vial.
- Las Estaciones con variabilidad moderada están conformadas por Sozoranga Inamhi, Catacocha, Gonzanama, Cariamanga, Jimbura, y Malacatos. Estas estaciones presentan medianas de precipitación en un rango similar al del primer grupo, entre 100-150 mm. Sin embargo, se caracterizan por una variabilidad moderada en la precipitación, con la presencia ocasional de valores atípicos que oscilan entre 300-600 mm. Esto señala la posibilidad de enfrentar lluvias intensas, aunque no de manera frecuente, lo que podría requerir atención en la planificación del drenaje y la gestión de aguas superficiales.
- Las Estaciones con alta variabilidad y eventos extremos las representan las estaciones de Saucillo (Alamor), Sabanilla-Predeur, Sabiango Inamhi, Amaluza Inamhi, Celica, Alamor, Colaisaca forman este último grupo. Exhiben medianas de precipitación que varían entre 75-200 mm, con una alta variabilidad y la presencia frecuente de valores atípicos significativos que exceden los 800-1 000 mm. Estos datos subrayan un mayor riesgo de precipitaciones extremas, lo que plantea desafíos significativos para la estabilidad y el mantenimiento de la red vial. Requieren una consideración especial para la planificación de infraestructura y la preparación para emergencias.

El análisis muestra una diversidad en los patrones de precipitación en la provincia de Loja. Se identifica desde estaciones con condiciones de precipitación estables y predecibles hasta aquellas con alta variabilidad y riesgo de eventos de lluvia extremos. Estos hallazgos son cruciales para la toma de decisiones informadas y la implementación de estrategias proactivas para la gestión de la infraestructura vial frente a los desafíos impuestos por el cambio climático.

Desde una perspectiva estadística, se evidenció un sesgo positivo en los datos de precipitación (Tabla 5), con medianas y modas generalmente menores a las medias mensuales. Además, se observaron amplias desviaciones típicas en estaciones como Cariamanga, Gonzanamá y Saucillo, resaltando una significativa variabilidad pluviométrica. La Prueba de Grubbs confirmó la presencia de valores extremos en la mayoría de las estaciones analizadas.

Tabla 5. Prueba de Grubbs para las 19 estaciones que poseen datos de precipitación media mensual multianual.

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desv.Est.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>G</b>	<b>P</b>
La Argelia-Loja	355	78,65	50,03	0,00	317,20	4,77	0,000
Saraguro	345	66,90	49,20	4,20	404,00	6,85	0,000
Malacatos	332	57,75	61,28	0,00	432,20	6,11	0,000
Cariamanga	353	118,02	139,42	0,00	636,30	3,72	0,062
Yangana	349	96,84	73,48	1,00	455,50	4,88	0,000
Celica	330	97,55	149,19	0,00	1117,90	6,84	0,000
Gozanamá	333	115,00	142,59	0,00	868,10	5,28	0,000
Amaluza Inamhi	341	75,58	117,52	0,00	1198,00	9,55	0,000
San lucas Inamhi	329	106,12	65,51	3,90	422,60	4,83	0,000
Sozoranga Inamhi	356	106,05	152,91	0,00	791,60	4,48	0,002
Alamor	353	117,82	178,46	0,00	871,30	4,22	0,007
Saucillo (Alamor)	342	72,89	153,76	0,00	875,70	5,22	0,000
Jimbura	353	114,35	134,65	0,00	838,20	5,38	0,000
Sabiango Inamhi	348	102,54	160,98	0,00	714,00	3,80	0,043
El pangui	350	141,93	55,68	0,00	368,20	4,06	0,014
Catacocha	331	97,01	62,82	6,70	347,10	3,98	0,019
Cajanuma	340	102,04	147,74	0,00	1270,60	7,91	0,000
Colaisaca	320	85,44	155,66	0,00	810,50	4,66	0,001

De las 19 estaciones de precipitación se revela la presencia de valores atípicos en todas las estaciones, excepto en Cariamanga. Los valores P son inferiores a 0,05 para 18 estaciones, lo que indica una fuerte evidencia estadística de la presencia de valores atípicos. Los valores G oscilan entre 3,72 y 9,55, siendo Amaluza Inamhi, Cajanuma, Saraguro y Celica las estaciones con los valores atípicos más extremos. Estos resultados sugieren una variabilidad significativa en los patrones de precipitación y la necesidad de considerar técnicas estadísticas robustas o métodos de imputación adecuados al analizar estos datos.

El análisis estadístico realizado pone de manifiesto la ocurrencia de eventos de precipitación extrema y una marcada variabilidad espacial asociada en la provincia de Loja, aspectos claves a considerar en estudios climáticos en esta región.

### 6.1.2 *Temperatura media mensual multianual*

Debido al 15 % de datos mensuales faltantes en las estaciones meteorológicas de la zona, se definieron 4 estaciones que contienen registros relativamente completos dentro del período de 1981 al 2010 para el análisis estadístico de temperaturas medias multianuales en la RVE E-35. Estas estaciones fueron: La Argelia-Loja, Saraguro, Cariamanga y Zaruma.

Se aplicó la prueba de Grubbs a las series de temperatura media multianual de cuatro estaciones (Tabla 6) para detectar posibles valores atípicos. Sin embargo, los resultados no revelaron la presencia de valores atípicos estadísticamente significativos en ninguna de las estaciones analizadas, ya que todos los valores P fueron superiores al nivel de significancia de 0,05. Aunque las estaciones La Argelia y Zaruma presentaron los estadísticos G más elevados (3,07 y 2,82, respectivamente), sugiriendo una mayor diferencia entre el valor máximo y la media en comparación con las otras estaciones, estas diferencias no fueron lo suficientemente grandes como para ser consideradas valores atípicos significativos según la prueba de Grubbs.

Tabla 6. Prueba de Grubbs para las 4 estaciones que poseen datos de temperatura media multianual

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>G</b>	<b>P</b>
La Argelia-Loja	355	16,096	0,650	14,100	17,700	3,07	0,708
Saraguro	336	14,332	1,043	11,900	16,600	2,33	1,000
Cariamanga	350	17,898	0,587	15,900	19,100	3,41	0,210
Zaruma	334	21,853	0,620	20,200	23,600	2,82	1,000

Se resaltó la importancia de análisis gráficos (Figura 12), dando valores extremos en algunas estaciones. Los gráficos evidenciaron desviaciones en La Argelia, Saraguro y Zaruma.



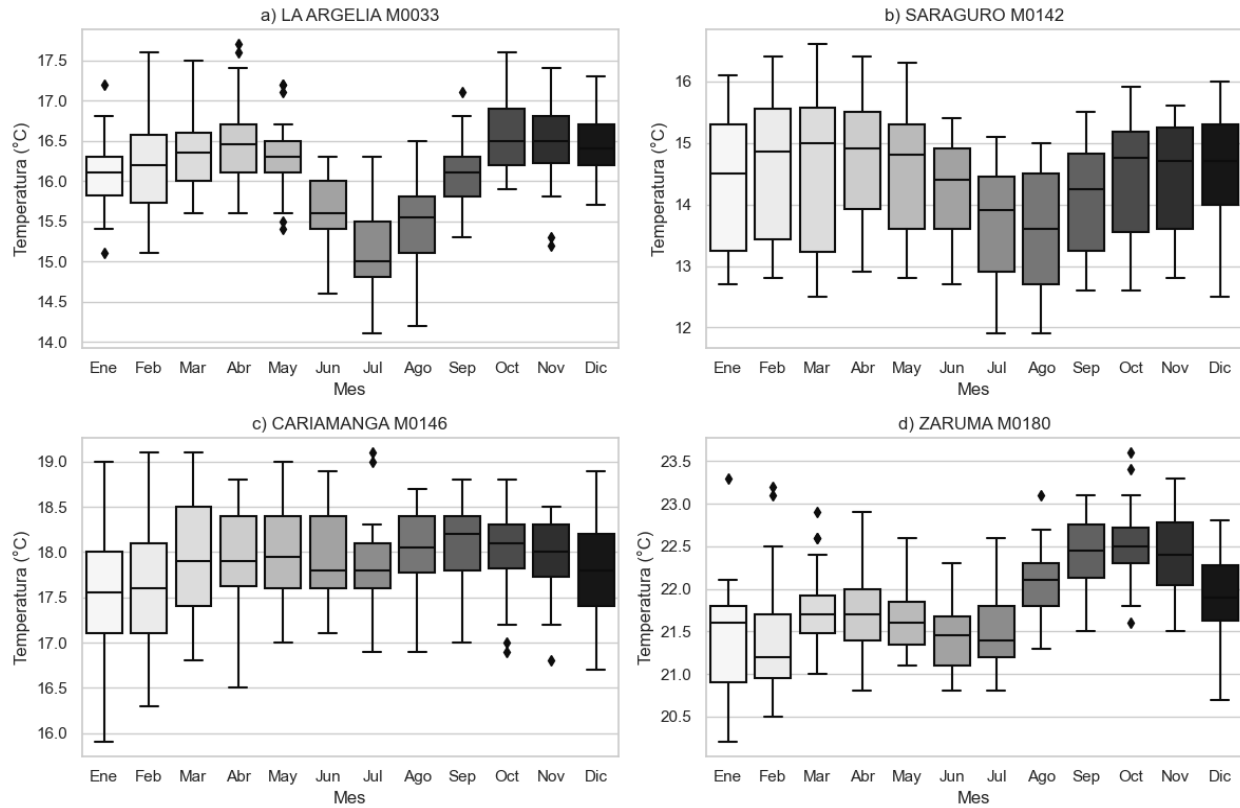


Figura 12. Distribución de la temperatura media mensual plurianual por estación y visualización de valores atípicos.

El estudio resaltó la necesidad de considerar la variabilidad y consistencia de datos climáticos en cada estación, proporcionando una base para futuras investigaciones regionales.

El análisis realizado sobre las temperaturas medias multianuales en la RVE E-35 puso de manifiesto la presencia de algunos valores atípicos, aunque en su mayoría las series siguieron una distribución normal, resaltando la relevancia de los análisis gráficos y la consistencia de datos.

### 6.1.3 Temperatura media máxima multianual

Tras definir las estaciones con base en un 15 % de datos faltantes, se observaron valores atípicos específicos en cada una, siendo más variables La Argelia-Loja y Yangana (Figura 13). Cariamanga mostró un patrón distinto con 3 valores atípicos en el mes (agosto). Malacatos reflejó patrones similares a La Argelia-Loja.

La Figura 13 presenta un análisis de los datos de temperatura máxima mensual multianual registrados en cinco estaciones meteorológicas ubicadas en la región sur del Ecuador, abarcando el período comprendido entre 1981 y 2010. La estación La Argelia M0033 exhibió temperaturas máximas fluctuando entre 17,8 °C y 24,4 °C, con una desviación estándar de 1,33 °C. Además, se identificaron valores atípicos de 17,88 °C y 17,80 °C en esta estación. En contraste, la estación Saraguro M0142 registró temperaturas máximas oscilando entre 15,2 °C y 23,3 °C, sin presencia de valores atípicos y con una desviación estándar de 1,78 °C.

Por otra parte, la estación Malacatos M0143 se destacó por presentar las temperaturas más elevadas, con un rango que abarcó desde 25,5 °C hasta 30,8 °C y una desviación estándar de 1,05 °C. Se identificaron valores atípicos bajos de 25,9 °C y 25,5 °C en esta estación. En comparación, la estación Cariamanga M0146 mostró temperaturas máximas variando entre 21,03 °C y 27,12 °C, con una desviación estándar de 1,24 °C y sin registros de valores atípicos significativos.

Por último, la estación Yangana M0147 presentó temperaturas máximas comprendidas entre 20,2 °C y 27,7 °C, con una desviación estándar de 1,20 °C. En esta estación se detectaron valores extremos puntuales de 20,2 °C y 27,1 °C. En términos generales, las cinco estaciones analizadas exhibieron una variabilidad moderada en sus temperaturas máximas, con desviaciones estándar oscilando entre 1,05 °C y 1,78 °C. Asimismo, se registraron ocasionalmente valores atípicos tanto por encima como por debajo de los rangos habituales en algunas de las estaciones estudiadas.

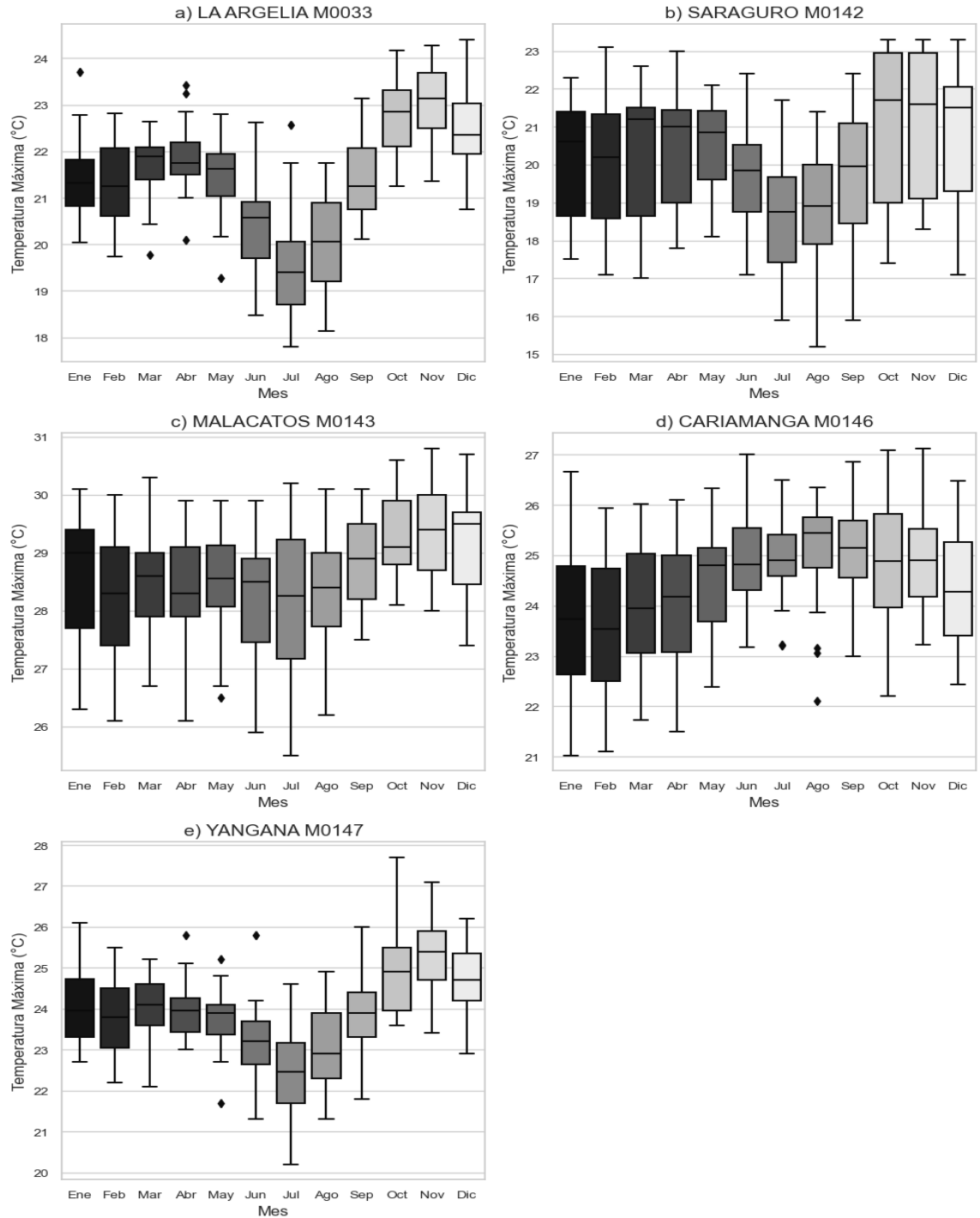


Figura 13. Distribución de la temperatura media mensual plurianual por estación y visualización de valores atípicos.

La prueba de Grubbs (Tabla 7) reveló uniformidad en la mayoría de las estaciones con p-valor de 1,000, excepto Yangana con 0,506.

Tabla 7. Prueba de Grubbs para las 5 estaciones que poseen datos de temperatura media multianual máxima.

Variable	N	Media	Desv. Est.	Mín.	Máx.	G	P
La Argelia-Loja	354	21,417	1,335	17,803	24,400	2,71	1,000
Saraguro	322	20,105	1,776	15,200	23,300	2,76	1,000
Malacatos	327	28,616	1,051	25,500	30,800	2,96	0,936
Cariamanga	350	24,482	1,236	21,026	27,121	2,80	1,000
Yangana	313	23,958	1,201	20,200	27,700	3,13	0,506

A pesar de algunas fluctuaciones y valores atípicos, los datos de temperatura máxima analizados demostraron coherencia y estabilidad en general. Se observó una clara variabilidad estacional, con temperaturas máximas más altas registradas típicamente entre enero y abril, y temperaturas más bajas de junio a septiembre en la mayoría de las estaciones. La Argelia M0033 y Saraguro M0142 mostraron la mayor amplitud térmica anual, mientras que Malacatos M0143 presentó temperaturas consistentemente altas a lo largo del año.

Estos hallazgos subrayan la confiabilidad de los datos y la necesidad de continuar el monitoreo climático preciso en la región para la RVE E-35. El análisis estadístico de las temperaturas máximas multianuales evidenció valores atípicos específicos, aunque en general las series fueron uniformes, resaltando la relevancia de la continuidad en la vigilancia climatológica regional.

#### **6.1.4 Temperatura media mínima multianual**

Con un 15 % de datos mensuales faltantes, se definieron 3 estaciones con series relativamente completas de temperatura mínima mensual multianual para el periodo 1981-2010: La Argelia-Loja, Saraguro y Carriamanga. El análisis en estas estaciones evidenció:

- Las temperaturas mínimas variaron de 2,9 °C a 14,8 °C entre estaciones, reflejando sus características climáticas singulares. La desviación estándar fluctuó de 0,8 °C a 2,5 °C, demostrando diferencias en variabilidad. Estos rangos coinciden con los datos presentados en la Tabla 8.
- En La Argelia M0033, la media de temperatura mínima fluctuó entre 8,3 °C y 13,9 °C, con varios valores atípicos en enero, mayo, octubre y diciembre.

- En Saraguro M0142, la media varió de 2,9 °C a 12,1 °C, con valores atípicos bajos de 3,2 °C en junio, septiembre, octubre y noviembre. En Cariamanga M0146, las temperaturas oscilaron entre 6,0 °C y 14,8 °C, con valores atípicos durante casi todos los meses descartando solo diciembre. Estos resultados son consistentes con la información presentada en los gráficos de la Figura 13.

Los gráficos (Figura 14) evidencian fluctuaciones en La Argelia, Saraguro y Cariamanga. La prueba de Grubbs (Tabla 8) detectó valores atípicos significativos solo en La Argelia-Loja.

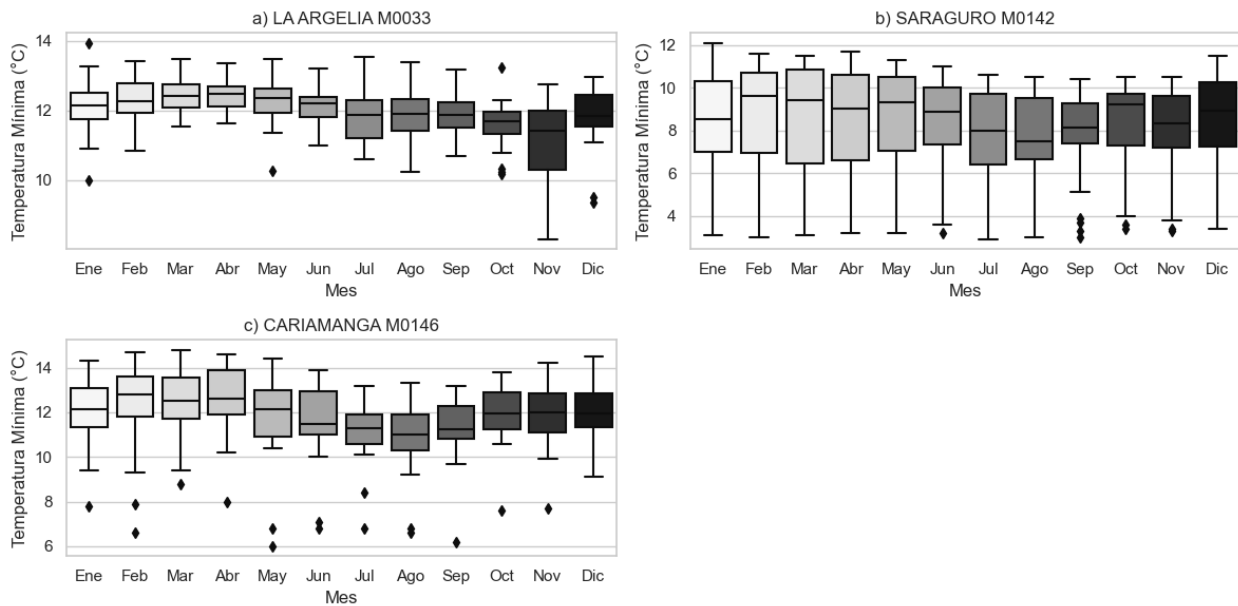


Figura 14. Distribución de la temperatura mínima mensual plurianual por estaciones y visualización de valores atípicos.

Tabla 8. Prueba de Grubbs para las 3 estaciones que poseen datos de temperatura media mínima multianual.

Variable	N	Media	Desv. Est.	Mín.	Máx.	G	P
La Argelia-Loja	354	11,970	0,793	8,310	13,935	4,62	0,001
Saraguro	321	8,151	2,450	2,900	12,100	2,14	1,000
Cariamanga	332	11,831	1,578	6,000	14,800	3,70	0,063

La prueba de Grubbs (Tabla 8) reveló que La Argelia-Loja presenta un valor atípico significativo, con un estadístico G de 4,62 y un valor P de 0.001. En contraste, Saraguro no muestra evidencia de valores atípicos, con un valor G de 2,14 y un valor P de 1,000. Para Cariamanga,

aunque el valor G de 3,70 es relativamente alto, el valor P de 0,063 indica que la evidencia de un valor atípico no es estadísticamente significativa al nivel de confianza del 95 %.

### 6.1.5 Imputación de los datos de precipitación y temperatura para el estudio

El estudio se enfocó en el análisis multianual, desde 1981 hasta 2010, de variables climáticas, incluyendo precipitación y distintas métricas de temperatura. Para completar conjuntos de datos de varias estaciones, se emplearon técnicas de imputación, considerando parámetros "pmm<sup>5</sup>", "norm<sup>6</sup>", "rf<sup>7</sup>" y "mean<sup>8</sup>". Tras recopilar los datos, se realizó una evaluación basada en el error cuadrático para determinar la precisión de los métodos de imputación. De este análisis, el método "mean" resaltó como el más eficiente en la reconstrucción de datos faltantes, indicando su potencial para futuras investigaciones similares.

#### 6.1.5.1 Precipitación mensual multianual

Se aplicaron técnicas de imputación para completar series de precipitación de 19 estaciones en el período 1981-2010. El método 'mean' resultó ser el más eficiente según el error cuadrático en la mayoría de las estaciones, aunque 'pmm' y 'rf' fueron mejores en algunos casos específicos (Tabla 9).

Tabla 9. Error cuadrático de los datos imputados de las 19 estaciones para la precipitación mensual multianual.

Estaciones	Imputaciones			
	pmm	norm	rf	media
La Argelia-Loja	2181,99	2171,40	2177,36	2171,99
Saraguro	2166,37	2149,18	2169,95	2126,35
Malacatos	3604,15	3540,36	3487,04	3295,70
Cariamanga	14968,27	14998,16	14902,82	14802,47
Yangana	4682,37	4674,98	4680,32	4601,74
Celica	14322,74	14868,03	14880,23	14333,34
Gonzanama	17097,43	16219,51	15996,78	15602,50
Amaluza Inamhi	12060,92	12375,69	12027,37	11862,92
San Lucas Inamhi	3984,88	3981,01	3990,39	3615,75

5 Predictive mean matching

6 Normal

7 Random forest

8 Media

Estaciones	Imputaciones			
	pmm	norm	rf	media
Sozoranga Inamhi	15594,11	15706,48	15659,91	15502,96
Alamor	23468,59	23483,07	23496,28	23503,28
Saucillo (Alamor)	18644,52	18698,51	19498,48	18297,61
Jimbura	14762,88	14828,53	14743,27	14625,32
Sabiango Inamhi	17945,67	17967,74	17989,38	18004,13
El Panguí	3067,01	2992,47	2985,40	2888,89
Catacocha	7527,23	7512,63	7556,95	7495,61
Cajanuma	3310,55	3334,04	3379,71	3079,74
Colaisaca	16776,00	16692,11	17060,26	16653,91
Sabanilla-Predesur	18068,07	19039,53	19058,89	17169,95

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de homogeneidad de los datos de precipitación mensual multianual para las 19 estaciones (Tabla 10). Las pruebas estadísticas han revelado inhomogeneidades significativas en varias estaciones, especialmente en Malacatos, Celica, Gonzanamá, San Lucas, Inamhi, Cajanuma y Sabanilla-Predesur. Estos quiebres podrían estar asociados a diversos factores, como cambios en las condiciones de medición o influencias climáticas. Se requiere un estudio más detallado para determinar si fenómenos como El Niño están directamente relacionados con estas inhomogeneidades.

Tabla 10. Análisis de homogeneización de datos de precipitación mensual multianual para 19 estaciones en la provincia de Loja.

Imputaciones	pmm	norm	rf	media
La Argelia-Loja	2181,99	2171,40	2177,36	2171,99
Saraguro	2166,37	2149,18	2169,95	2126,35
Malacatos	3604,15	3540,36	3487,04	3295,70
Cariamanga	14968,27	14998,16	14902,82	14802,47
Yangana	4682,37	4674,98	4680,32	4601,74
Celica	14322,74	14868,03	14880,23	14333,34
Gonzanama	17097,43	16219,51	15996,78	15602,50
Amaluza Inamhi	12060,92	12375,69	12027,37	11862,92
San lucas Inamhi	3984,88	3981,01	3990,39	3615,75
Sozoranga Inamhi	15594,11	15706,48	15659,91	15502,96
Alamor	23468,59	23483,07	23496,28	23503,28
Saucillo (Alamor)	18644,52	18698,51	19498,48	18297,61
Jimbura	14762,88	14828,53	14743,27	14625,32
Sabiango Inamhi	17945,67	17967,74	17989,38	18004,13
El Panguí	3067,01	2992,47	2985,40	2888,89
Catacocha	7527,23	7512,63	7556,95	7495,61
Cajanuma	3310,55	3334,04	3379,71	3079,74
Colaisaca	16776,00	16692,11	17060,26	16653,91
Sabanilla-Predesur	18068,07	19039,53	19058,89	17169,95

### 6.1.5.2 Temperatura media mensual multianual

Para imputar datos faltantes de temperatura media mensual multianual en las estaciones de La Argelia-Loja, Saraguro, Cariamanga y Zaruma, se evaluaron cuatro métodos: 'pmm', 'norm', 'rf' y 'mean'. El método 'mean' presentó el menor error cuadrático en las cuatro estaciones analizadas (Tabla 11), lo que indica su superioridad en términos de precisión de imputación en comparación con los otros métodos.

Tabla 11. Error cuadrático de los datos imputados de las 4 estaciones para la temperatura media mensual multianual.

Estación	pmm	norm	rf	media
La Argelia-Loja	0,40	0,41	0,41	0,40
Saraguro	0,44	0,43	0,47	0,43
Cariamanga	0,33	0,34	0,34	0,33
Zaruma	0,31	0,30	0,30	0,29

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de homogeneidad de los datos de temperatura media mensual multianual utilizando las pruebas de Pettitt, SNHT, Buishand y von Neumann (Tabla 12). Los resultados revelaron puntos de cambio significativos en las estaciones de La Argelia-Loja y Saraguro, según la prueba de Pettitt, con valores p de 0,00 en ambos casos. Esto sugiere la presencia de inhomogeneidades en estas series, que podrían atribuirse a diversos factores como cambios en las condiciones de medición, reubicación de estaciones o influencias climáticas.

Tabla 12. Resultado del análisis de homogeneización de datos de temperatura media mensual multianual para 4 estaciones en la provincia de Loja.

Estación	Punto de cambio de Pettitt	Valor p de Pettitt	Punto de cambio SNHT	Valor p de SNHT	Valor p de Buishand	Relación von Neumann
La Argelia-Loja	357,00	0,00	271,00	0,49	0,00	0,82
Saraguro	359,00	0,00	117,00	0,29	0,00	0,34
Cariamanga	245,00	0,11	86,00	0,49	0,00	0,71
Zaruma	358,00	0,68	342,00	0,50	0,00	0,75

Además, la prueba de Buishand detectó cambios significativos en la varianza de todas las estaciones, con valores p de 0,00. Esto indica la presencia de fluctuaciones en la variabilidad de las temperaturas medias a lo largo del tiempo, lo que podría estar relacionado con cambios en las condiciones climáticas, modificaciones en el entorno de las estaciones o problemas en la calidad de los datos.



Es importante tener en cuenta que las inhomogeneidades y los cambios en la varianza detectados en las series de temperatura media pueden deberse a diversos factores, como errores de medición, cambios en los equipos o procedimientos de registro, o influencias climáticas reales. Para determinar las causas específicas de estas inhomogeneidades, se requiere un análisis más detallado que considere la historia y metadatos de cada estación, así como la comparación con otras variables climáticas y factores ambientales.

### 6.1.5.3 Temperatura media máxima mensual multianual

Para imputar datos faltantes de temperatura media máxima mensual multianual en las estaciones de La Argelia-Loja, Saraguro, Malacatos, Cariamanga y Yangana, se evaluaron cuatro métodos: 'pmm', 'norm', 'rf' y 'mean'. El método 'mean' presentó el menor error cuadrático en las cinco estaciones analizadas (Tabla 13), demostrando su superioridad en términos de precisión de imputación en comparación con los otros métodos.

Tabla 13. Error cuadrático de los datos imputados de las 5 estaciones para la temperatura media máxima mensual multianual.

<b>Estación</b>	<b>pmm</b>	<b>norm</b>	<b>rf</b>	<b>media</b>
La Argelia-Loja	1,61	1,61	1,61	1,60
Saraguro	1,52	1,49	1,48	1,44
Malacatos	0,98	0,95	0,92	0,85
Cariamanga	1,13	1,11	1,13	1,10
Yangana	1,26	1,26	1,27	1,12

El análisis de homogeneidad de los datos de temperatura media máxima mensual multianual, utilizando las pruebas de Pettitt, SNHT, Buishand y von Neumann (Tabla 14), reveló un punto de cambio significativo en la estación de Saraguro, según la prueba de Pettitt, con un valor p de 0,01. Este resultado sugiere la presencia de una inhomogeneidad en la serie de Saraguro, que podría atribuirse a diversos factores como cambios en las condiciones de medición, reubicación de la estación o influencias climáticas.

Además, la prueba de Buishand detectó cambios significativos en la varianza de todas las estaciones, con valores p de 0,00. Esto indica la presencia de fluctuaciones en la variabilidad de las temperaturas máximas a lo largo del tiempo, lo que podría estar relacionado con cambios en las condiciones climáticas, modificaciones en el entorno de las estaciones o problemas en la calidad de los datos.

Tabla 14. Resultado del análisis de homogeneización de datos de temperatura media mensual máxima multianual para 5 estaciones en la provincia de Loja.

Estación	Punto de cambio de Pettitt	Valor p de Pettitt	Punto de cambio de SNHT	SNHT p valor	Valor p de Buishand	Relación von Neumann
La Argelia-Loja	272,00	0,60	272,00	0,54	0,00	354,56
Saraguro	249,00	0,01	152,00	0,54	0,00	147,53
Malacatos	164,00	0,10	107,00	0,54	0,00	234,60
Cariamanga	162,00	0,07	133,00	0,54	0,00	193,67
Yangana	248,00	0,41	165,00	0,54	0,00	357,22

Es importante destacar que las inhomogeneidades y los cambios en la varianza detectados en las series de temperatura media máxima pueden deberse a diversos factores, como errores de medición, cambios en los equipos o procedimientos de registro, o influencias climáticas reales. Para determinar las causas específicas de estas anomalías, se requiere un análisis más detallado que considere la historia y metadatos de cada estación, así como la comparación con otras variables climáticas y factores ambientales.

#### 6.1.5.4 Temperatura media mínima mensual multianual

Para imputar datos faltantes de temperatura media mínima mensual multianual en las estaciones de La Argelia-Loja, Saraguro y Cariamanga, se evaluaron cuatro métodos: 'pmm', 'norm', 'rf' y 'mean'. Los métodos 'mean' y 'pmm' presentaron el menor error cuadrático dependiendo de la estación (Tabla 15). En La Argelia-Loja y Cariamanga, el método 'mean' fue el más preciso, mientras que, en Saraguro, 'pmm' tuvo el mejor desempeño.

Tabla 15. Error cuadrático de los datos imputados de las 3 estaciones para la temperatura media mínima mensual multianual.

Estación	pmm	norm	rf	media
"La Argelia-Loja"	0,52	0,53	0,53	0,52
"Saraguro"	2,33	2,42	2,43	2,50
"Cariamanga"	2,08	2,09	2,36	1,94

El análisis de homogeneidad de los datos de temperatura media mínima mensual multianual, utilizando las pruebas de Pettitt, SNHT, Buishand y von Neumann (Tabla 16), reveló un punto de cambio significativo en la estación de Saraguro, según la prueba de Pettitt, con un valor p de 0,01. Este resultado sugiere la presencia de una inhomogeneidad en la serie de Saraguro,

que podría atribuirse a diversos factores como cambios en las condiciones de medición, reubicación de la estación o influencias climáticas.

Además, la prueba de Buishand detectó cambios significativos en la varianza de las tres estaciones analizadas, con valores p de 0,00. Esto indica la presencia de fluctuaciones en la variabilidad de las temperaturas mínimas a lo largo del tiempo, lo que podría estar relacionado con cambios en las condiciones climáticas, modificaciones en el entorno de las estaciones o problemas en la calidad de los datos.

Tabla 16. Resultado del análisis de homogeneización de datos de temperatura media mensual máxima multianual para 3 estaciones en la provincia de Loja.

Estación	Punto de cambio de Pettitt	Valor p de Pettitt	Punto de cambio SNHT	Valor p de SNHT	Valor p de Buishand	Relación von Neumann
La Argelia-Loja	240,00	0,49	239,00	0,54	0,00	466,59
Saraguro	193,00	0,01	114,00	0,54	0,00	122,08
Cariamanga	261,00	0,10	239,00	0,54	0,00	191,50

El procesamiento y análisis de las distintas variables climáticas evidenció la presencia de rupturas e inhomogeneidades que podrían estar asociadas a El Niño en la provincia de Loja, siendo fundamental su consideración en estudios climáticos regionales.

#### **6.1.6 Evaluación estadística de datos que generaron información a nivel mensual**

El análisis de las series históricas de datos climáticos disponibles para la zona de la RVE E-35 en el periodo 1981-2010 resultó clave para caracterizar el comportamiento de parámetros como la precipitación y temperatura.

Mediante estadísticos descriptivos y representaciones gráficas fue posible examinar los regímenes medios y la variabilidad de estas variables en las principales estaciones meteorológicas de la provincia de Loja. Se evidenciaron claras diferencias entre estaciones en cuanto a magnitudes y tendencias. Por ejemplo, para la precipitación se observó una marcada estacionalidad con máximos entre diciembre-abril y mínimos en julio a agosto.

Las temperaturas medias, máximas y mínimas también mostraron fluctuaciones espaciales. Estos resultados pusieron de manifiesto la necesidad de considerar la heterogeneidad climática al

interior de la región en estudios y modelaciones. A continuación, se presenta el detalle del análisis realizado para precipitación, temperatura máxima, media y mínima multianual en la zona de la RVE E-35 durante el periodo histórico 1981-2010.

### **6.1.7 *Precipitación multianual***

El análisis de la precipitación multianual para 19 estaciones en la provincia de Loja durante el período 1981-2010 reveló un régimen marcadamente estacional, con valores máximos en marzo y mínimos en julio y agosto (Tabla 17, Figura 15). La precipitación media mensual mostró una alta variabilidad espacial, con diferencias notables entre estaciones cercanas.

La Tabla 17 presenta la precipitación media mensual multianual para cada estación, junto con estadísticos descriptivos como la media, mediana, máximo, mínimo y desviación estándar. Estos datos permiten comparar los patrones de precipitación entre las estaciones y resaltan la variabilidad de las lluvias a lo largo del año.

Tabla 17. Precipitación media mensual multianual de 1981 al 2010 de 19 estaciones en la provincia de Loja.

Estaciones	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media	Mediana	Max	Min	Dest_est	q1	q2	q3
<b>La Argelia-Loja</b>	92,73	126,47	147,28	99,09	62,65	51,87	48,70	39,83	38,27	75,84	69,34	91,75	78,65	72,59	147,28	38,27	34,23	51,08	72,59	94,32
<b>Saraguro</b>	75,81	99,08	138,90	87,48	59,98	36,74	33,13	30,45	33,46	56,55	63,30	87,88	66,90	61,64	138,90	30,45	32,79	35,92	61,64	87,58
<b>Malacatos</b>	67,74	101,80	119,80	91,85	41,06	12,98	9,40	11,61	26,09	74,43	57,29	78,92	57,75	62,51	119,80	9,40	37,58	22,81	62,51	82,15
<b>Cariamanga</b>	160,80	271,58	323,61	240,04	88,03	20,21	11,43	16,10	26,84	61,52	70,40	125,69	118,02	79,21	323,61	11,43	108,13	25,18	79,21	180,61
<b>Yangana</b>	126,62	181,27	173,08	119,49	78,04	61,57	45,94	35,60	40,96	96,05	80,91	122,53	96,84	88,48	181,27	35,60	48,91	57,66	88,48	123,55
<b>Celica</b>	223,47	261,26	288,16	157,71	56,61	15,03	9,24	7,29	13,07	24,64	33,99	80,09	97,55	45,30	288,16	7,29	106,10	14,54	45,30	174,15
<b>Gonzanama</b>	165,47	211,12	280,05	226,47	99,78	29,04	15,09	11,73	31,15	76,28	105,69	128,20	115,00	102,74	280,05	11,73	89,70	30,62	102,74	176,88
<b>Amaluza Inamhi</b>	118,87	165,74	191,03	119,55	60,43	8,94	7,05	4,61	18,97	51,50	69,27	90,96	75,58	64,85	191,03	4,61	63,05	16,46	64,85	119,04
<b>San Lucas Inamhi</b>	91,04	121,02	147,90	133,68	118,50	112,41	102,85	67,98	58,74	96,79	99,48	123,05	106,12	107,63	147,90	58,74	25,72	95,36	107,63	121,53
<b>Sozoranga Inamhi</b>	157,68	305,18	355,63	218,43	74,68	19,75	9,47	6,57	9,91	20,50	22,99	71,82	106,05	47,41	355,63	6,57	124,14	17,29	47,41	172,86
<b>Alamor</b>	170,23	294,14	406,42	248,04	92,31	17,84	13,35	6,05	6,79	20,08	30,42	108,15	117,82	61,36	406,42	6,05	134,08	16,72	61,36	189,68
<b>Saucillo (Alamor en)</b>	102,71	196,67	315,74	150,94	27,62	9,21	6,85	0,18	2,61	7,21	10,53	44,47	72,89	19,07	315,74	0,18	100,44	7,12	19,07	114,77
<b>Jimbura</b>	170,92	255,17	329,47	174,43	82,56	15,73	13,30	7,38	25,10	66,01	84,11	148,04	114,35	83,33	329,47	7,38	103,42	22,76	83,33	171,80
<b>Sabiango Inamhi</b>	144,19	310,87	357,74	196,36	67,64	20,11	9,95	5,16	4,97	18,33	24,33	70,86	102,54	45,99	357,74	4,97	123,90	16,23	45,99	157,23
<b>El Panguí</b>	120,71	137,03	157,52	197,65	166,94	154,23	147,78	112,44	121,40	135,64	129,90	121,88	141,93	136,34	197,65	112,44	24,33	121,76	136,34	155,05
<b>Catacocha</b>	125,61	211,88	232,26	137,52	43,92	11,17	2,26	4,94	9,86	26,54	30,43	71,32	75,64	37,18	232,26	2,26	81,89	10,85	37,18	128,59
<b>Cajanuma</b>	118,74	162,88	176,59	124,91	82,66	67,59	55,76	46,97	45,63	83,34	85,00	113,99	97,01	84,17	176,59	45,63	43,12	64,64	84,17	120,28
<b>Colaisaca</b>	134,67	227,24	317,71	208,86	84,02	24,77	6,87	7,97	19,03	50,74	50,63	91,98	102,04	67,38	317,71	6,87	100,51	23,33	67,38	153,22
<b>Sabanilla-Predesur</b>	110,94	226,42	330,34	160,38	43,46	19,41	12,59	9,14	13,29	16,39	21,84	61,07	85,44	32,65	330,34	9,14	103,56	15,61	32,65	123,30

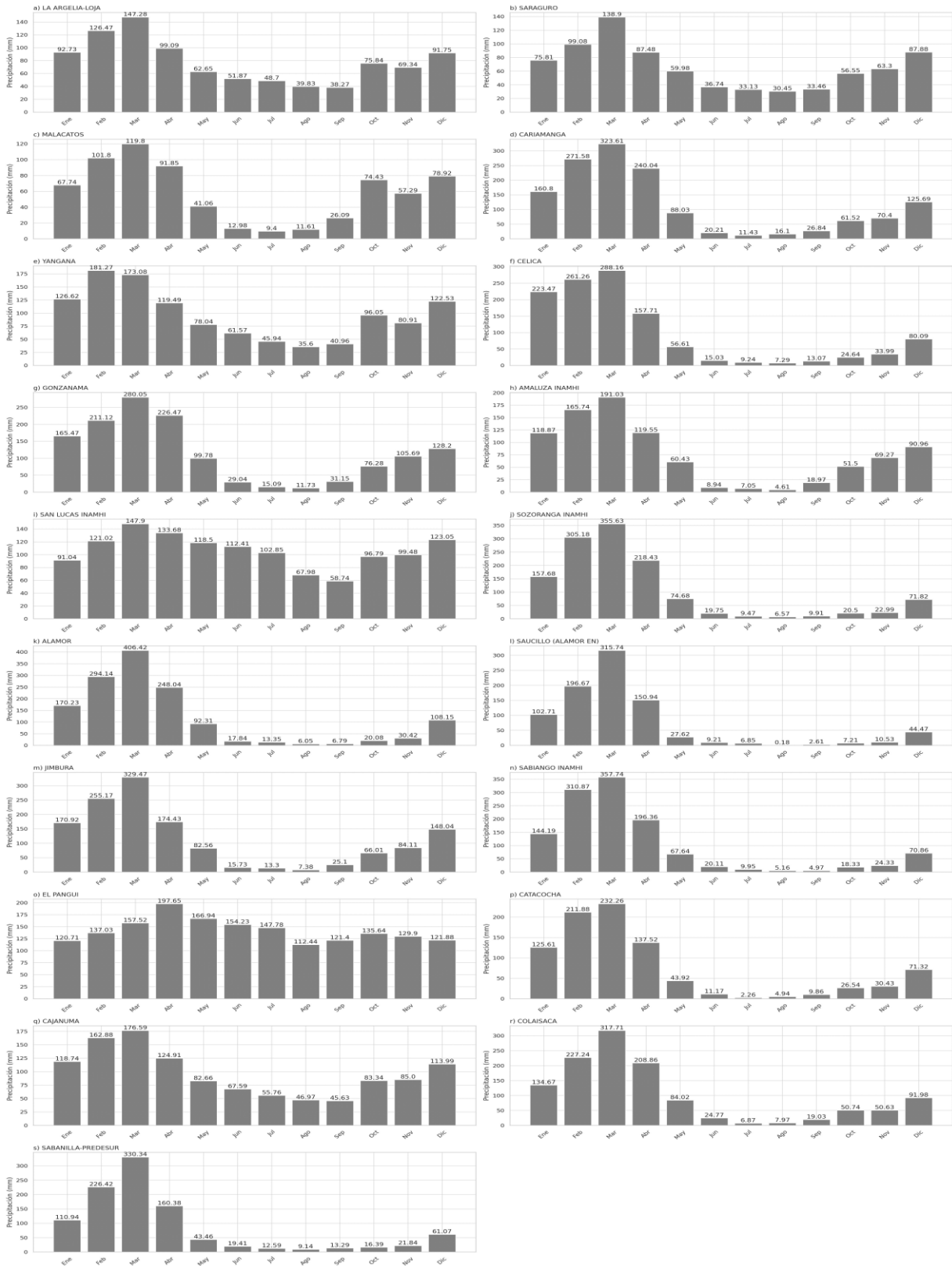


Figura 15. Precipitación media mensual de 19 estaciones entre 1981-2010.

Además, se calcularon los principales estadísticos descriptivos para cada estación (Tabla 18), incluyendo la media, desviación estándar, mínimo, máximo y cuartiles. Estos datos permiten comparar las características generales de la precipitación entre las estaciones.

Tabla 18. Principales estadísticos descriptivos para cada estación para precipitación.

<b>Estaciones</b>	<b>media</b>	<b>sd</b>	<b>min</b>	<b>max</b>	<b>Q1</b>	<b>Q3</b>	<b>mediana</b>
La Argelia-Loja	955,62	160,68	726,50	1379,20	861,32	1051,95	922,30
Saraguro	854,37	232,88	601,30	1597,90	725,68	945,53	768,83
Malacatos	774,44	364,87	282,00	2295,01	626,33	854,38	711,28
Cariamanga	1453,65	410,66	622,30	2297,50	1183,95	1744,65	1490,20
Yangana	1199,67	246,48	781,23	1575,45	992,00	1403,91	1194,10
Celica	1349,71	823,52	471,22	3866,97	923,90	1395,15	1030,20
Gonzanamá	1445,62	638,69	636,80	3283,60	1013,03	1622,26	1256,70
Amaluza INAMHI	964,27	633,87	61,90	2219,30	458,09	1312,45	906,15
San lucas INAMHI	1338,79	341,51	682,80	1990,60	1176,16	1546,74	1373,54
Sozoranga INAMHI	1295,92	587,14	515,40	3080,70	883,93	1605,08	1233,20
Alamor	1481,39	712,86	549,20	3618,20	921,50	1748,31	1334,60
Saucillo (Alamor en)	955,94	733,18	105,00	3060,07	371,70	1407,93	890,20
Jimbura	1414,80	495,23	522,00	2648,39	1085,68	1777,79	1319,45
Sabiango INAMHI	1315,86	602,17	616,10	2779,50	828,93	1590,88	1287,25
El Pangui	1731,13	195,18	1310,40	2296,60	1605,12	1834,39	1725,05
Catacocha	942,61	344,27	284,00	1766,34	664,65	1144,13	951,65
Cajanuma	1256,72	359,69	730,30	2383,70	1107,08	1271,25	1195,75
Colaisaca	1340,07	556,55	614,20	2775,16	910,50	1679,37	1240,67
Sabanilla-Predesur	1232,03	796,31	306,30	3046,20	553,50	1430,25	1219,15

Se destacó que El Pangui presentó el promedio anual más alto con 1 731,13 mm, mientras que Malacatos registró el promedio más bajo con 774 mm. Estas diferencias resaltan la alta variabilidad espacial de la precipitación en la provincia de Loja, incluso entre estaciones relativamente cercanas.

El análisis de la precipitación multianual en las 19 estaciones de la provincia de Loja durante el período 1981-2010 reveló un régimen estacional bien definido, con máximos en marzo y mínimos en julio y agosto. Se observó una alta variabilidad espacial en los patrones de precipitación, con diferencias significativas entre estaciones.

### 6.1.7.1 Temperatura media máxima multianual

El análisis de las temperaturas máximas multianuales en 5 estaciones de la provincia de Loja durante el período 1981-2010 reveló diferencias espaciales y temporales. La Tabla 19 presenta los datos de temperatura media mensual máxima para las estaciones La Argelia - Loja, Saraguro, Malacatos, Cariamanga y Yangana, mientras que la Figura 16 muestra la distribución de estas temperaturas a lo largo del año.

Tabla 19. Datos de temperatura media mensual máxima para las estaciones La Argelia - Loja, Saraguro, Malacatos y Cariamanga

<b>Estación</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Julio</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
La Argelia-Loja	21,35	21,27	21,69	21,83	21,46	20,31	19,53	19,96	21,45	22,66	23,02	22,47
Saraguro	20,09	20,06	20,29	20,49	20,40	19,69	18,87	18,98	19,78	20,85	21,08	20,67
Malacatos	28,65	28,27	28,52	28,35	28,47	28,16	28,19	28,40	28,87	29,21	29,22	29,07
Cariamanga	23,68	23,62	24,04	24,01	24,48	24,89	24,84	25,07	25,10	24,90	24,81	24,34
Yangana"	24,13	23,74	24,00	23,95	23,83	23,33	22,67	23,18	23,94	24,86	25,19	24,68



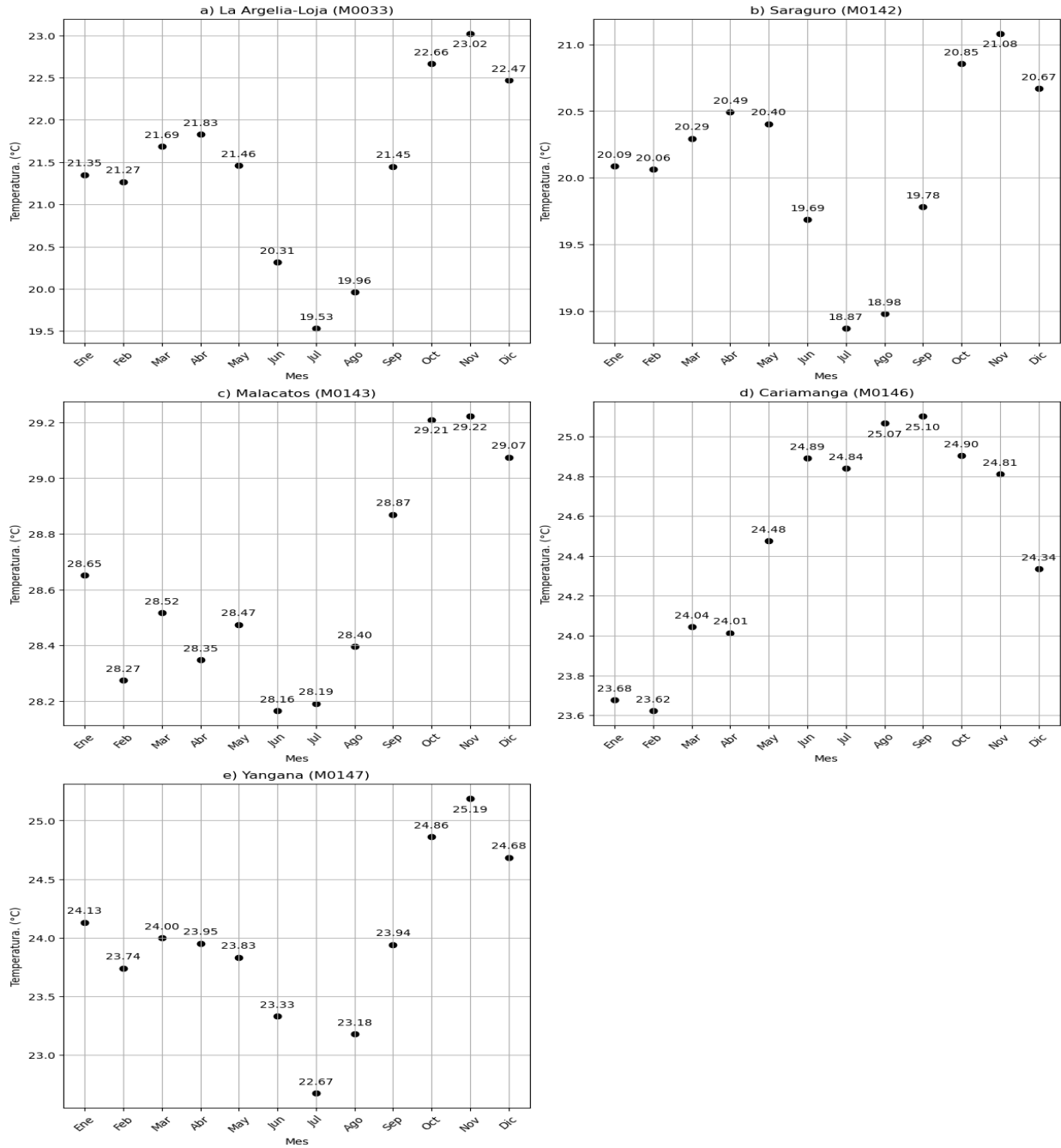


Figura 16. Temperatura media máxima multianual para el período 1981 al 2010

Se observó que Malacatos presentó las temperaturas máximas más altas, mientras que Saraguro registró las más bajas. La Tabla 20 resume los principales estadísticos descriptivos para cada estación, destacando que Malacatos tuvo la media anual más alta (28,6 °C) y Saraguro la más baja (20,1 °C).

Tabla 20. Resumen de los principales estadísticos descriptivos para cada estación de temperatura media mensual máxima multianual

Estación	media	mediana	min	max	sd	Q3	Q1
La Argelia-Loja	21,42	21,45	19,53	23,02	1,06	21,99	21,03
Saraguro	20,10	20,19	18,87	21,08	0,69	20,53	19,76
Malacatos	28,62	28,50	28,16	29,22	0,39	28,92	28,33
Cariamanga	24,48	24,64	23,62	25,10	0,53	24,90	24,04
Yangana	23,96	23,95	22,67	25,19	0,71	24,27	23,64

Además de las diferencias espaciales, se realizó un análisis de tendencias de la temperatura máxima anual durante el período 1981-2010 para cada estación (Figura 17). Los resultados revelaron tendencias crecientes significativas en todas las estaciones, con diferentes tasas de cambio:

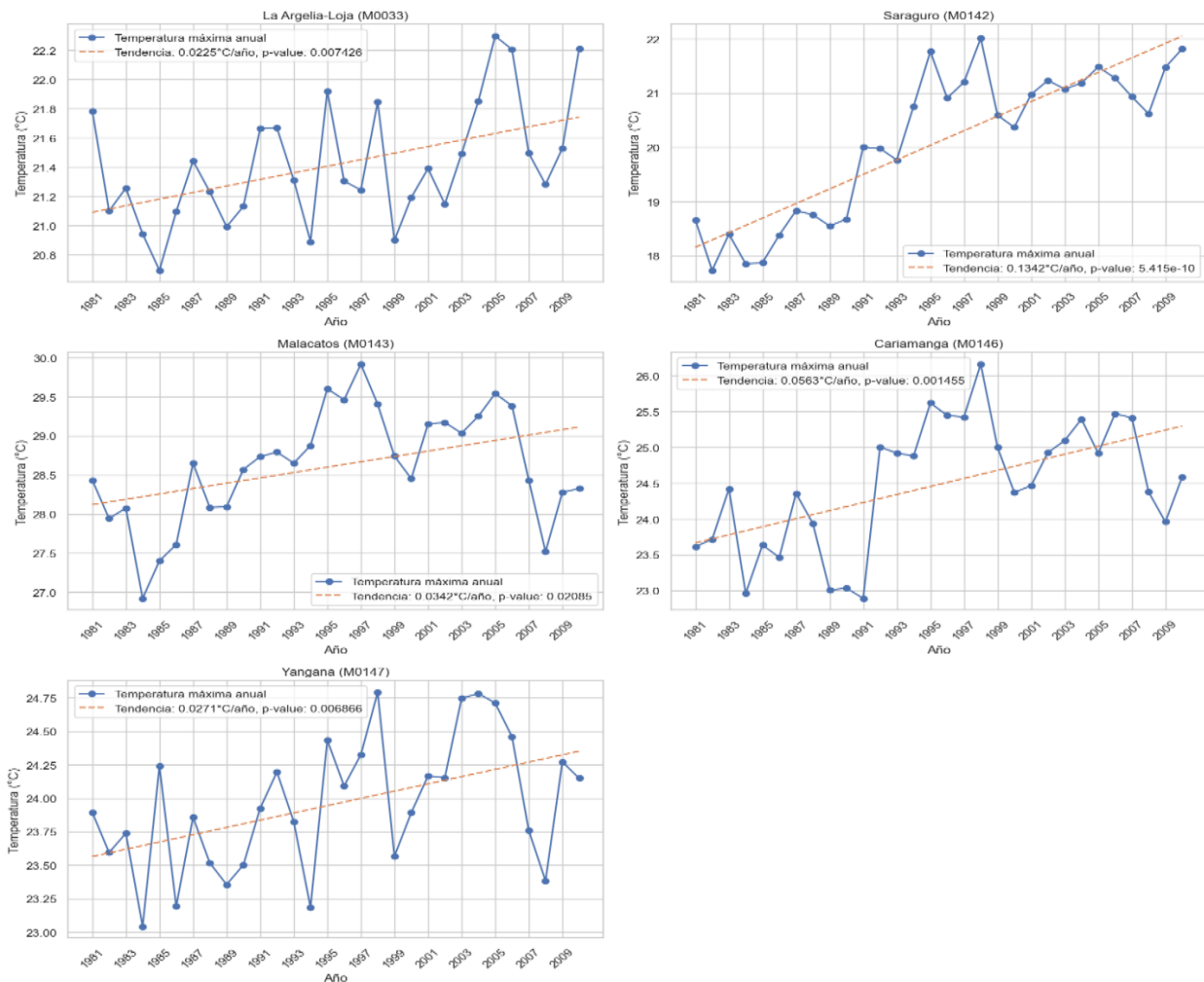


Figura 17. Tendencias en la temperatura máxima anual durante del período 1981 a 2010.

Estos resultados indican que la temperatura máxima ha aumentado de manera significativa en todas las estaciones durante el período de estudio, con diferentes tasas de cambio según la ubicación. La estación Saraguro presentó la tendencia más pronunciada, con una pendiente de 0,1342 y un p-valor de  $8,18 \times 10^{-53}$ , seguida de Cariamanga, Malacatos, Yangana y La Argelia.

En conjunto, el análisis de las temperaturas máximas multianuales en 5 estaciones de la provincia de Loja durante el período 1981-2010 reveló diferencias espaciales y tendencias crecientes significativas en todas las estaciones. Estos resultados resaltan la importancia de considerar la variabilidad espacial y las tendencias climáticas en la planificación y gestión de los recursos naturales y las actividades socioeconómicas en la provincia de Loja.

### 6.1.7.2 Temperatura media mensual multianual

El análisis de las temperaturas medias mensuales multianuales en 4 estaciones de la provincia de Loja durante el período 1981-2010 reveló diferencias espaciales y temporales. La Tabla 21 presenta los datos de temperatura media mensual para las estaciones La Argelia, Saraguro, Cariamanga y Zaruma, mientras que la Figura 18 muestra la distribución de estas temperaturas a lo largo del año.

Tabla 21. Temperaturas medias mensuales multianuales 1981 al 2010.

<b>Estación</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
La Argelia	16,10	16,14	16,35	16,45	16,28	15,63	15,15	15,48	16,10	16,53	16,49	16,46
Saraguro	14,34	14,57	14,59	14,69	14,58	14,22	13,72	13,72	14,08	14,46	14,46	14,56
Cariamanga	17,57	17,64	17,93	17,95	17,99	17,97	17,87	18,01	18,07	18,04	17,95	17,79
Zaruma	21,47	21,47	21,79	21,75	21,71	21,44	21,51	22,06	22,37	22,46	22,32	21,90

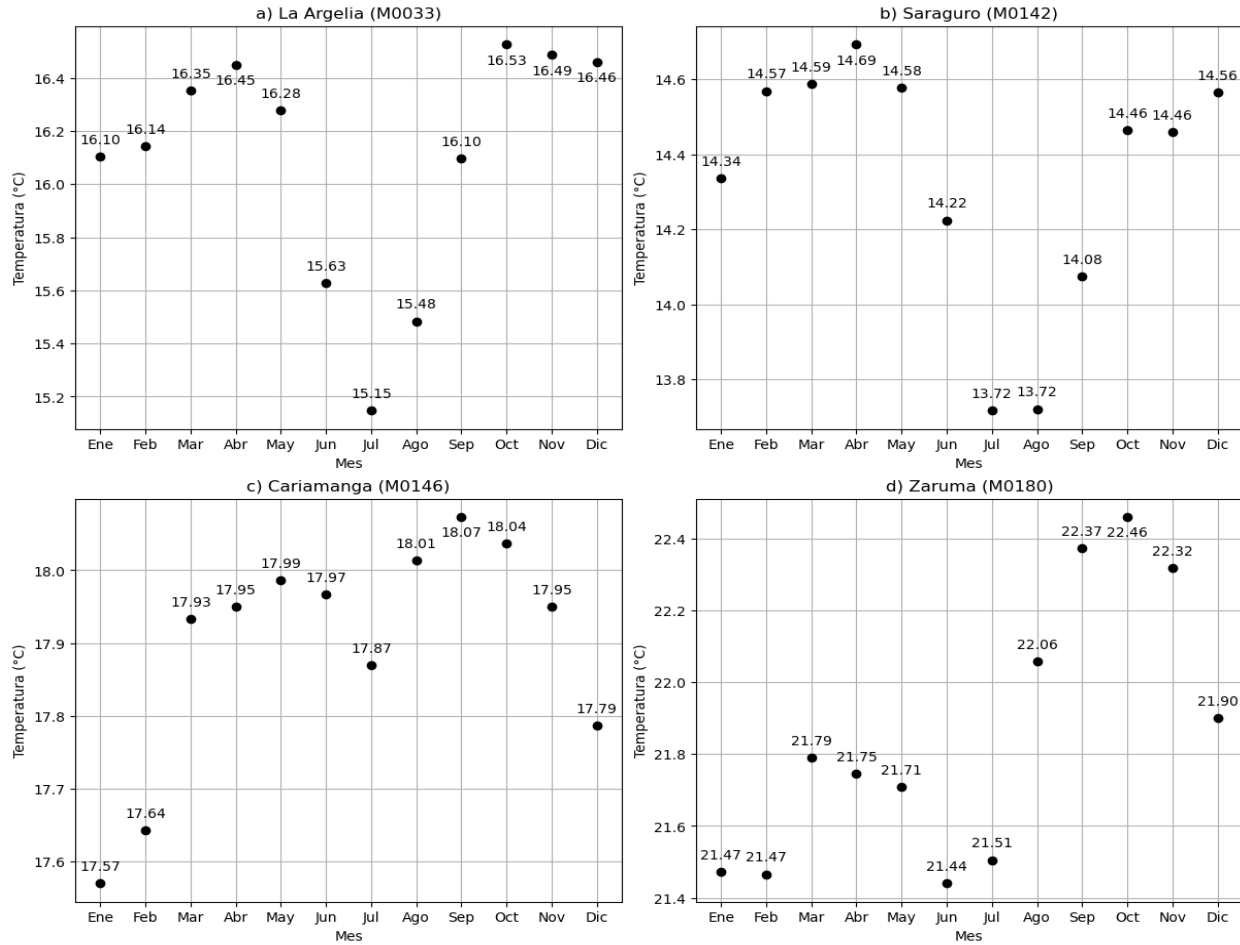


Figura 18. Las temperaturas medias mensuales multianual para el periodo 1981 al 2010.

Se observó que Zaruma presentó las temperaturas medias más altas, mientras que Saraguro registró las más bajas. La Tabla 22 resume los principales estadísticos descriptivos para cada estación, destacando que Zaruma tuvo la media anual más alta (21,9 °C) y Saraguro la más baja (14,3 °C).

Tabla 22. Datos estadísticos de la Temperatura media mensual multianual para el periodo 1981 al 2010.

Estación	Media mensual	sd	min	Q1	mediana	Q3	max
La Argelia	16,10	0,45	15,15	15,98	16,21	16,45	16,53
Saraguro	14,33	0,33	13,72	14,19	14,46	14,57	14,69
Cariamanga	17,90	0,16	17,57	17,85	17,95	17,99	18,07
Zaruma	21,85	0,37	21,44	21,50	21,77	22,12	22,46

Además de las diferencias espaciales, se realizó un análisis de tendencias de la temperatura media anual durante el período 1981-2010 para cada estación (Figura 19). Los resultados revelaron

tendencias crecientes en todas las estaciones, aunque no se proporcionaron los valores de pendiente y significancia estadística

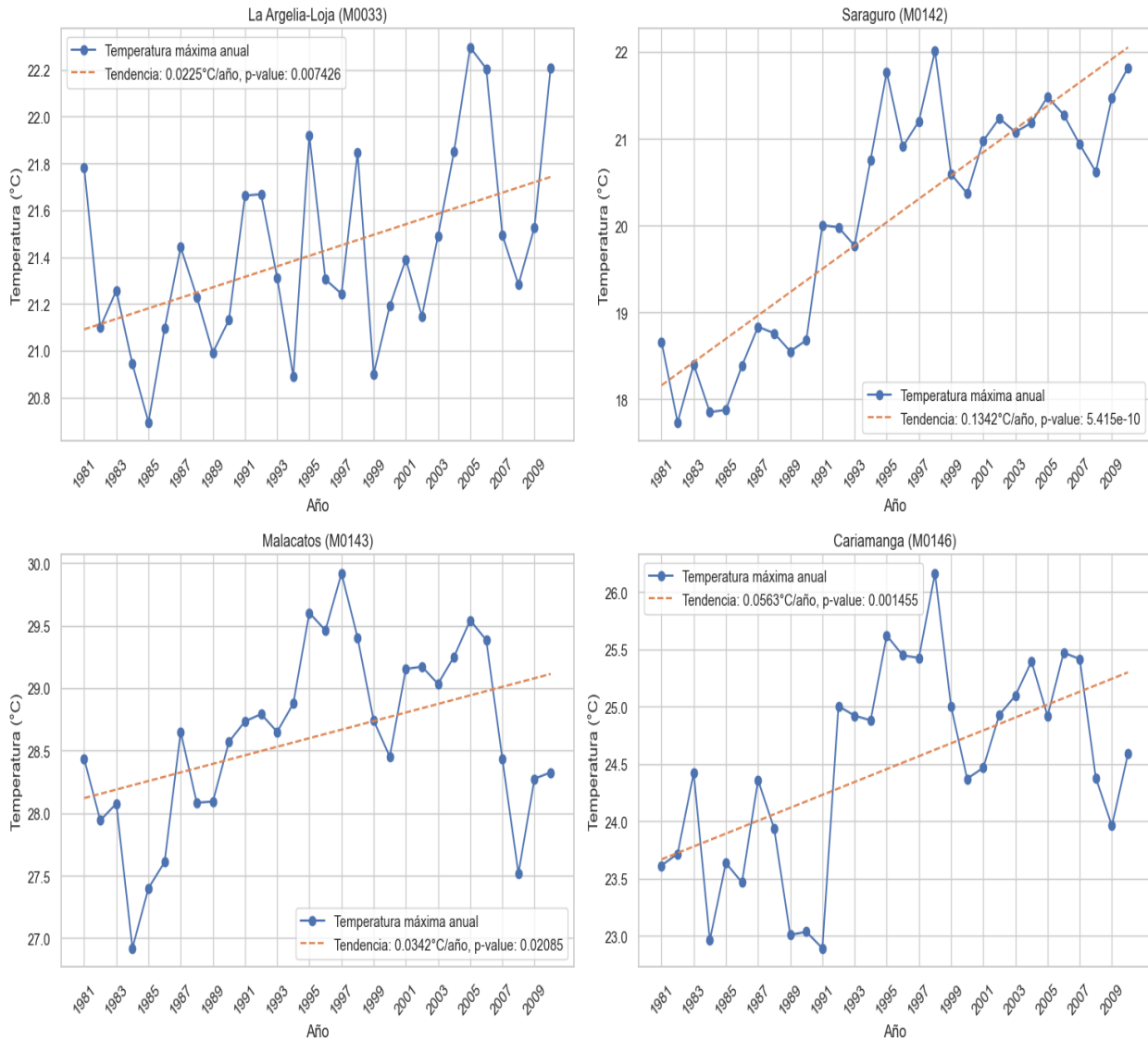


Figura 19. Tendencias de las temperaturas medias mensuales multianual para el periodo 1981 al 2010.

El análisis de las temperaturas medias mensuales multianuales en 4 estaciones de la provincia de Loja durante el período 1981-2010 reveló diferencias espaciales y tendencias crecientes en todas las estaciones. Estos resultados resaltan la importancia de considerar la variabilidad espacial y las tendencias climáticas en la planificación y gestión de los recursos naturales y las actividades socioeconómicas en la provincia de Loja. El análisis multianual de

variables climáticas en Loja evidenció regímenes y tendencias específicos para cada estación, resaltando la necesidad de considerar la variabilidad espacial en estudios climáticos regionales.

### 6.1.7.3 Temperatura media mínima multianual de 1981 al 2010

El análisis de las temperaturas mínimas multianuales en 3 estaciones de la provincia de Loja durante el período 1981-2010 reveló diferencias espaciales y temporales. La Tabla 23 presenta los datos de temperatura media mínima mensual para las estaciones La Argelia-Loja, Saraguro y Cariamanga, mientras que la Figura 20 muestra la distribución de estas temperaturas a lo largo del año.

Tabla 23. Temperatura media mínima multianual de 1981 al 2010

Estación	Ene	Feb	Marz	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
La Argelia-Loja	12,06	12,35	12,39	12,42	12,28	12,11	11,77	11,83	11,90	11,58	11,13	11,85
Saraguro	8,21	8,60	8,46	8,28	8,46	8,42	7,50	7,40	7,69	8,20	7,95	8,52
Cariamanga	12,11	12,30	12,47	12,54	11,83	11,49	11,15	10,91	11,35	11,92	11,90	12,01

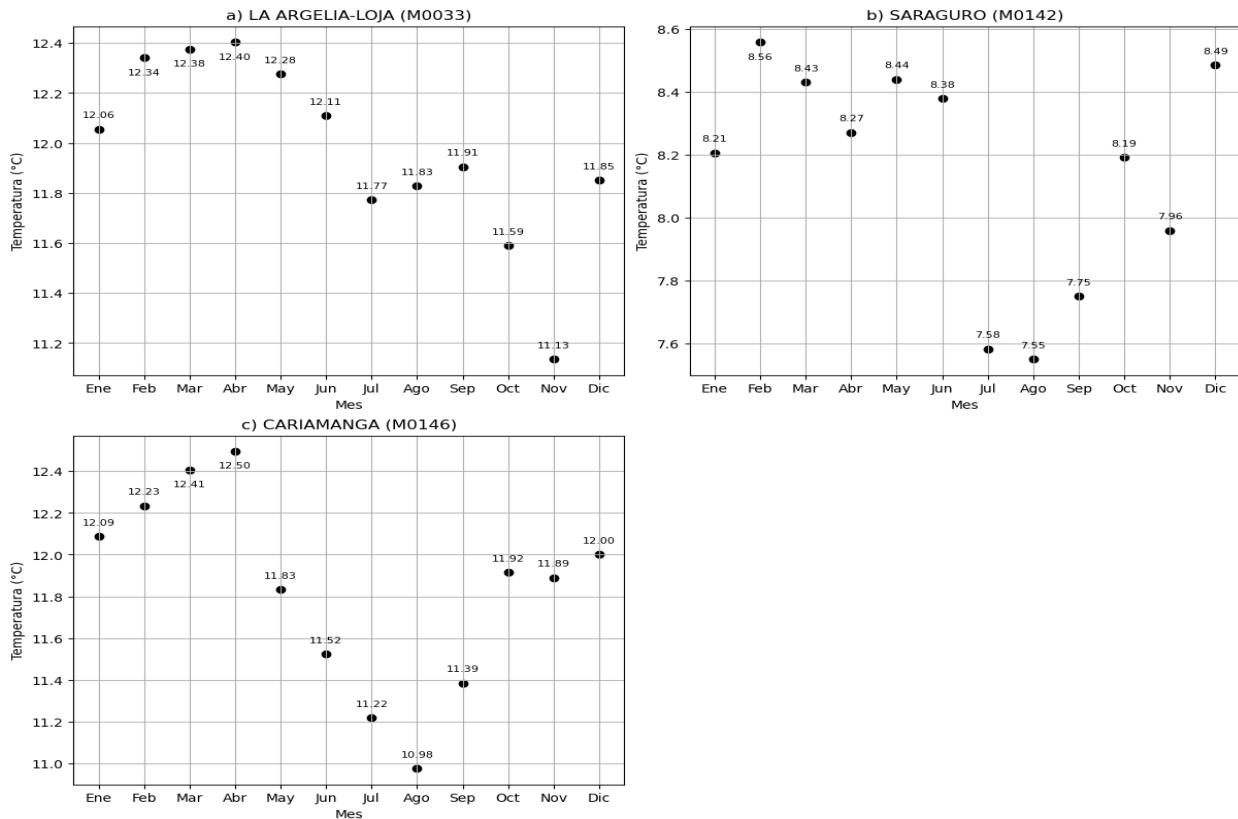


Figura 20. Temperatura mínima mensual multianual de 1981 al 2010.

Se observó que Saraguro registró las temperaturas mínimas más bajas, mientras que Cariamanga presentó las más altas. La Tabla 24 resume los principales estadísticos descriptivos para cada estación, destacando que Saraguro tuvo la media anual más baja (8,1 °C) y Cariamanga la más alta (11,8 °C).

Tabla 24. Temperatura mínima mensual multianual de 1981 al 2010.

Estación	mean	sd	min	Q1	median	Q3	max
La Argelia-Loja	11,97	0,38	11,13	11,81	11,98	12,29	12,42
Saraguro	8,14	0,41	7,40	7,88	8,24	8,46	8,60
Cariamanga	11,83	0,51	10,91	11,46	11,91	12,15	12,54

Además de las diferencias espaciales, se efectuó un análisis de tendencias de la temperatura mínima anual durante el período 1981-2010 para cada estación (Figura 21). Los resultados mostraron tendencias diferentes entre las estaciones:

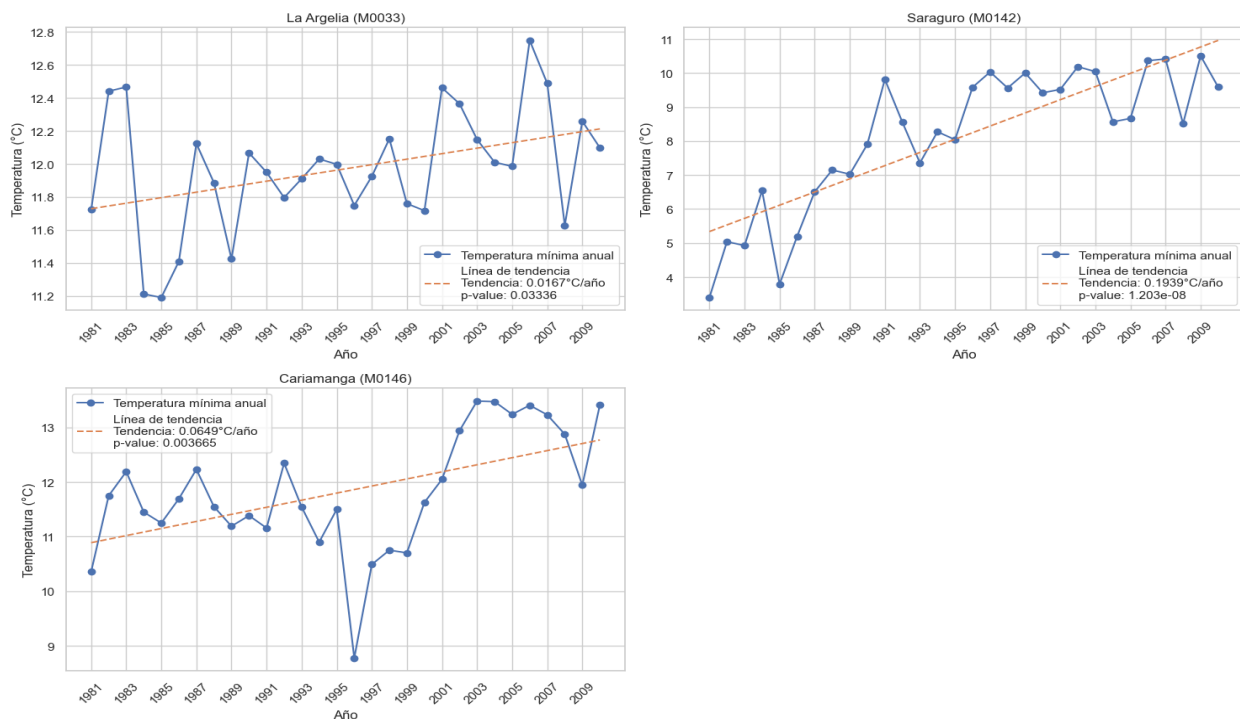


Figura 21. Tendencias de temperatura mínima multianual del periodo 1981 al 2010.

Estos resultados indican que, si bien todas las estaciones experimentaron cambios en las temperaturas mínimas durante el período analizado, la magnitud y dirección de estas tendencias variaron según la ubicación. Saraguro presentó el mayor aumento en las temperaturas mínimas, seguido de Cariamanga, mientras que La Argelia-Loja mostró una ligera disminución.

El análisis de las temperaturas mínimas multianuales en 3 estaciones de la provincia de Loja durante el período 1981-2010 reveló diferencias espaciales y tendencias variables entre las estaciones. Saraguro registró las temperaturas mínimas más bajas y Cariamanga las más altas, con medias anuales de 8,1 °C y 11,8 °C, respectivamente. Las tendencias anuales mostraron un aumento en Saraguro y Cariamanga, mientras que La Argelia-Loja presentó una ligera disminución. Estos resultados resaltan la importancia de considerar la variabilidad espacial y las tendencias climáticas específicas de cada estación en estudios climáticos regionales para la provincia de Loja.

### 6.1.8 Análisis de valores extremos máximos mensuales de lluvia

El análisis de los datos de precipitación máxima mensual de 19 estaciones en la provincia de Loja se realizó utilizando las funciones de distribución de Gumbel, Weibull y Gamma. La Tabla 25 presenta los resultados de las pruebas de bondad de ajuste, incluyendo los criterios de información de Akaike (AIC), Bayesiano (BIC) y la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS).

La función de distribución de Gumbel mostró el mejor ajuste en el 79% de las estaciones (15 de 19), con valores de AIC y BIC más bajos en comparación con las distribuciones de Weibull y Gamma. Además, los resultados de la prueba KS respaldaron la idoneidad de la distribución de Gumbel, presentando valores del estadístico KS menores y valores p más altos en la mayoría de las estaciones. Por ejemplo, en la estación Malacatos, el estadístico KS para la distribución de Gumbel fue de 0,07 con un valor p de 1,00, indicando un ajuste casi perfecto

Tabla 25. Valores extremos máximos mensuales de lluvia y pruebas estadísticas.

Estación	AIC Gumbel	BIC Gumbel	KS Statistic Gumbel	P-Value Gumbel	AIC Weibull	BIC Weibull	KS Statistic Weibull	P-Value Weibull	AIC Gamma	BIC Gamma	KS Statistic Gamma
La Argelia-Loja	320,28	323,09	0,13	0,63	331,87	336,07	0,16	0,39	325,59	329,80	0,16
Saraguro	321,95	324,75	0,14	0,59	337,97	342,17	0,19	0,21	328,98	333,18	0,18
Malacatos	327,28	330,09	0,07	1,00	341,02	345,23	0,16	0,42	332,62	336,83	0,10
Cariamanga	382,82	385,62	0,17	0,34	378,21	382,42	0,11	0,83	382,11	386,31	0,16
Yangana	347,58	350,38	0,14	0,57	356,47	360,67	0,18	0,28	351,58	355,78	0,16
Celica	397,83	400,63	0,11	0,82	404,08	408,28	0,15	0,49	400,47	404,67	0,12
Gonzanamá	394,67	397,48	0,11	0,85	400,07	404,27	0,15	0,46	396,90	401,11	0,12
Amaluza INAMHI	398,13	400,93	0,09	0,94	397,57	401,77	0,11	0,84	397,17	401,37	0,10



<b>Estación</b>	<b>AIC Gumbel</b>	<b>BIC Gumbel</b>	<b>KS Statistic Gumbel</b>	<b>P-Value Gumbel</b>	<b>AIC Weibull</b>	<b>BIC Weibull</b>	<b>KS Statistic Weibull</b>	<b>P-Value Weibull</b>	<b>AIC Gamma</b>	<b>BIC Gamma</b>	<b>KS Statistic Gamma</b>
San lucas INAMHI	338,19	340,99	0,13	0,67	344,65	348,86	0,10	0,88	340,60	344,80	0,10
Sozoranga INAMHI	386,14	388,94	0,11	0,84	389,74	393,94	0,12	0,74	387,72	391,92	0,09
Alamor	407,72	410,52	0,11	0,79	407,05	411,26	0,10	0,91	408,45	412,65	0,11
Saucillo (Alamor)	409,82	412,63	0,18	0,28	408,96	413,16	0,17	0,32	410,94	415,14	0,19
Jimbura	383,64	386,44	0,10	0,89	390,93	395,14	0,16	0,41	386,52	390,73	0,12
Sabiango INAMHI	392,94	395,74	0,10	0,91	392,33	396,54	0,08	0,99	393,59	397,79	0,09
El Pangui	323,16	325,96	0,10	0,90	332,28	336,48	0,16	0,40	326,42	330,62	0,12
Catacocha	368,86	371,66	0,11	0,81	368,59	372,80	0,08	0,97	369,86	374,06	0,10
Cajanuma	338,19	340,99	0,15	0,49	340,50	344,70	0,13	0,62	339,23	343,43	0,13
Colaisaca	403,74	406,55	0,07	1,00	408,77	412,97	0,11	0,80	405,60	409,80	0,08
Sabanilla-PREDESUR	410,66	413,46	0,12	0,77	409,69	413,90	0,10	0,91	410,55	414,75	0,13

Con la función que mejor se adaptó se calcularon tasas de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años para cada estación (Tabla 26). Se proyectaron las mayores precipitaciones máximas en Cariamanga, Alamor y Saucillo, con valores que superan los 150-1000 mm para un periodo de retorno de 100 años.

Tabla 26. Tasas de retorno para 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años.

<b>Estación</b>	<b>2 TR</b>	<b>5 TR</b>	<b>10 TR</b>	<b>25 TR</b>	<b>50 TR</b>	<b>100 TR</b>
La Argelia-Loja	163,61	206,71	235,24	271,29	298,04	324,59
Saraguro	152,07	195,27	223,87	260,01	286,82	313,43
Malacatos	163,84	213,25	245,97	287,31	317,97	348,41
Cariamanga	413,37	512,43	561,43	611,50	642,69	669,98
Yangana	229,29	298,30	343,99	401,72	444,55	487,06
Celica	365,28	527,79	635,38	771,33	872,19	972,29
Gonzanamá	336,63	488,48	589,02	716,04	810,28	903,82
Amaluza Inamhi	229,29	390,11	496,59	631,13	730,94	830,01
San Lucas Inamhi	199,90	261,26	301,88	353,21	391,29	429,09
Sozoranga Inamhi	393,79	533,35	625,74	742,49	829,10	915,07
Alamor	473,10	648,83	742,09	841,41	905,25	962,35
Saucillo (Alamor)	342,91	544,80	663,31	797,39	887,60	970,84
Jimbura	378,03	509,78	597,00	707,22	788,98	870,13

<b>Estación</b>	<b>2 TR</b>	<b>5 TR</b>	<b>10 TR</b>	<b>25 TR</b>	<b>50 TR</b>	<b>100 TR</b>
Sabiango	425,88	559,52	628,35	700,39	746,07	786,55
Inamhi						
El Pangui	232,95	281,23	313,19	353,57	383,53	413,27
Catacocha	284,76	375,41	422,22	471,28	502,42	530,04
Cajanuma	199,51	262,82	304,74	357,70	396,99	435,99
Colaisaca	348,97	526,05	643,29	791,43	901,32	1010,40
Sabanilla	350,15	556,50	677,65	814,75	907,00	992,13

Las tasas de retorno calculadas y presentadas en la Tabla 26 muestran un aumento en las precipitaciones máximas estimadas a medida que se consideran periodos de retorno más largos, lo cual es un resultado esperado de la metodología utilizada. Estos incrementos no necesariamente implican una tendencia creciente en las precipitaciones máximas a lo largo del tiempo ni proporcionan evidencia directa del impacto del cambio climático en la región. Sin embargo, es crucial considerar estos eventos extremos en la planificación y gestión.

En el caso específico de la estación Amaluza, se observa un aumento de 198,88 mm en la precipitación máxima estimada al pasar de un período de retorno de 25 años (631,13 mm) a uno de 100 años (830,01 mm). De manera similar, en la estación Célica, el aumento es de 200,96 mm, pasando de 771,33 mm para un período de retorno de 25 años a 972,29 mm para un período de retorno de 100 años

La Figura 22 ilustra la variabilidad de las precipitaciones máximas estimadas para diferentes periodos de retorno en las estaciones analizadas. Sin embargo, esta figura no proporciona evidencia directa del impacto del cambio climático en la región, ya que las tasas de retorno se basan en la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos y no en tendencias climáticas a largo plazo

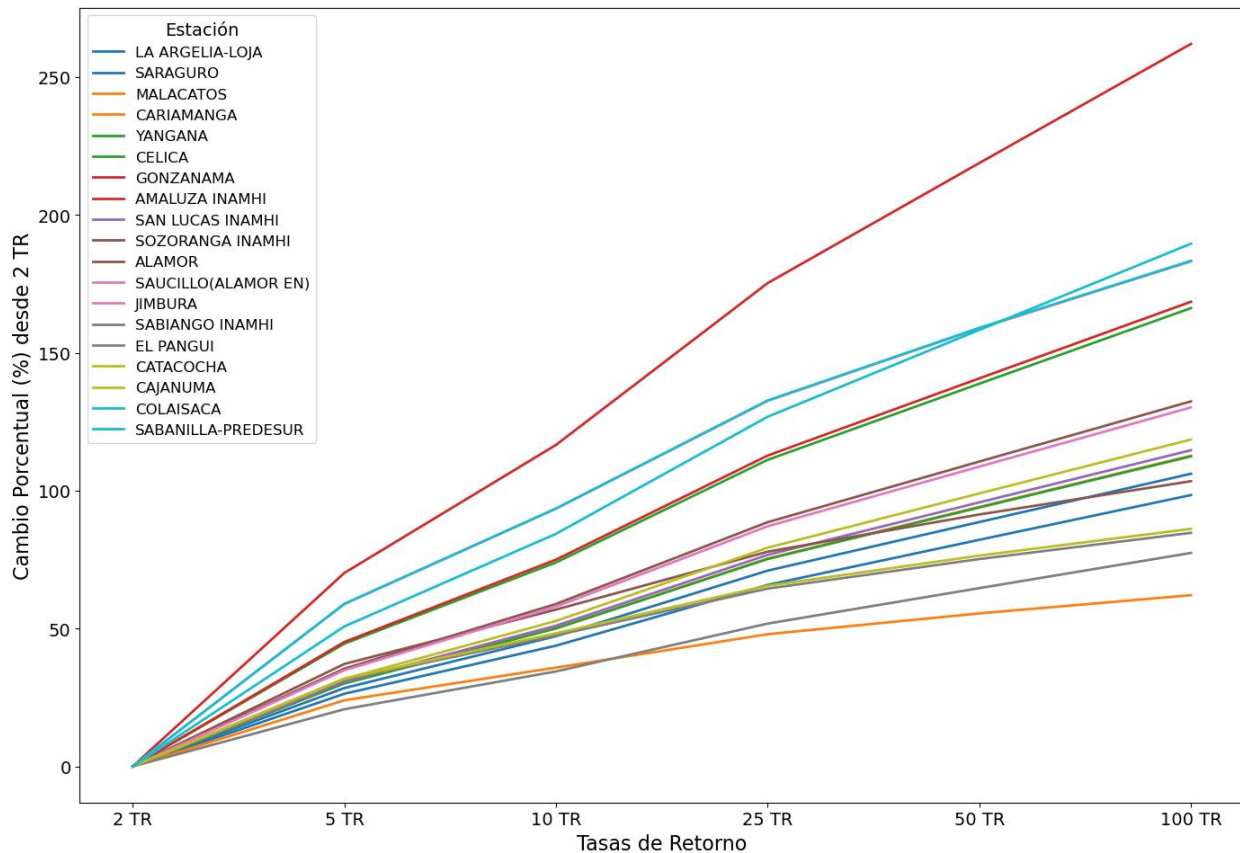


Figura 22. Cambio porcentual de las precipitaciones máximas con periodos de retorno largos.

A pesar de que los incrementos en las precipitaciones máximas estimadas para periodos de retorno más largos no necesariamente indican una tendencia creciente en las precipitaciones máximas a lo largo del tiempo, es fundamental considerar estos eventos extremos en la planificación y gestión de infraestructuras. El diseño de infraestructuras resilientes debe tener en cuenta las precipitaciones máximas estimadas para diferentes periodos de retorno, a fin de garantizar su capacidad para hacer frente a eventos extremos y minimizar los impactos negativos en la región

**6.1.9 Generación de mapas por interpolación de los datos de precipitación, temperatura media, mínima y máxima del corredor de la vía Loja - Catamayo.**

Esta sección presenta los resultados de la interpolación de datos de precipitación y temperaturas (media, mínima y máxima) para el período 1981-2010 en el área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo, definida como una franja de 500 metros a cada lado del eje de la carretera.

La elección de esta área se basa en la interacción entre la vía y variables ambientales como uso del suelo y sistemas ecológicos.

La metodología empleada fue la interpolación por IDW para precipitación y Kriging para temperaturas, seleccionados por su precisión en representar la variabilidad climática, considerando factores ambientales detallados en la planificación vial. Este enfoque permite una representación fiel de dicha variabilidad y extiende el análisis más allá de los confines inmediatos de la vía, enriqueciendo la caracterización ambiental del área de influencia directa.

Los resultados detallan patrones estacionales y variabilidades significativas en precipitación y temperaturas, aportando información valiosa para decisiones sobre infraestructura vial, adaptación al cambio climático y mitigación de riesgos naturales en la zona de estudio.

#### **6.1.9.1 Precipitación en el área de influencia de la vía Loja Catamayo**

El análisis mensual multianual de 1981-2010 mostró que marzo tuvo la precipitación media más alta con 179,6 mm, seguido por febrero con 153,5 mm. Los meses más secos fueron julio (43,8 mm) y agosto (35,5 mm). Se evidenció un patrón estacional, con mayor pluviosidad al inicio del año y menor en los meses centrales.

Las Figuras 22 y 23 ilustran estos resultados. La Figura 23 muestra los mapas de interpolación de la precipitación media mensual, resaltando las variaciones espaciales en la zona de estudio. La Figura 230 presenta estas variaciones de forma gráfica en un diagrama de barras.

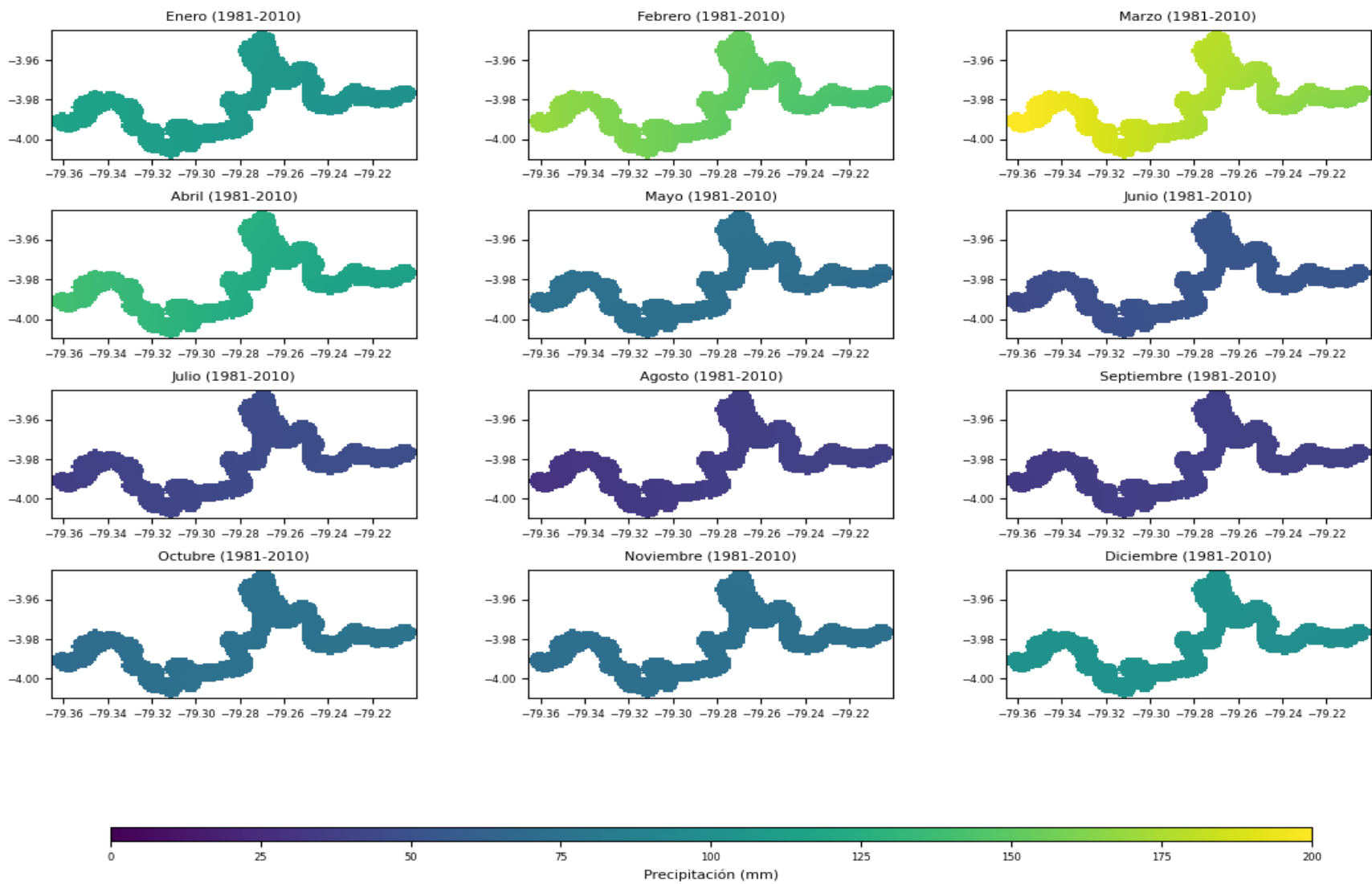


Figura 23. Precipitaciones medias multianuales del área de Influencia Directa para el periodo de 1981 al 2010.

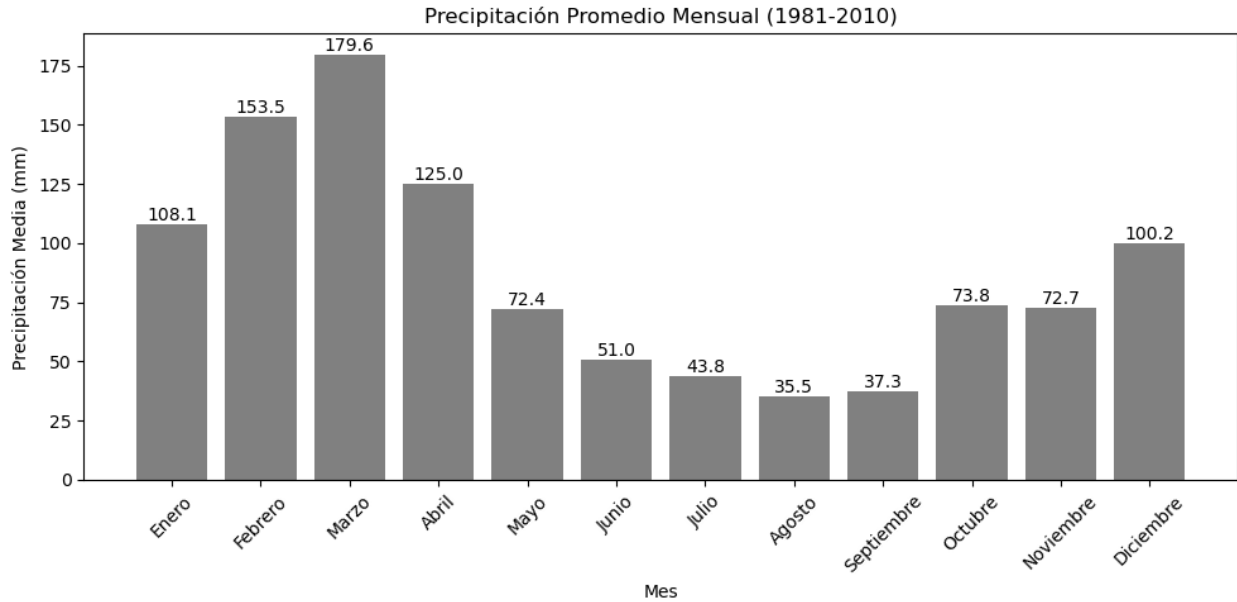


Figura 24. Distribución mensual de la precipitación de la vía Loja-Catamayo.

### 6.1.9.2 Tasas de retorno del área de influencia directa de la vía Loja Catamayo

El análisis de tasas de retorno (Tabla 27 y Figura 25) indicó un aumento de la precipitación máxima esperada para periodos más largos. Por ejemplo, para un periodo de retorno de 100 años se estimaron 453,70 mm, casi el 116 % de los 210 mm estimados para 2 años.

Tabla 27. Tasas de retorno del área de influencia directa de la vía Loja Catamayo.

Periodo	Tasas de retorno para la vía Loja Catamayo (mm)
2 años	210,00
5 años	277,70
10 años	321,30
25 años	375,30
50 años	414,80
100 años	453,70

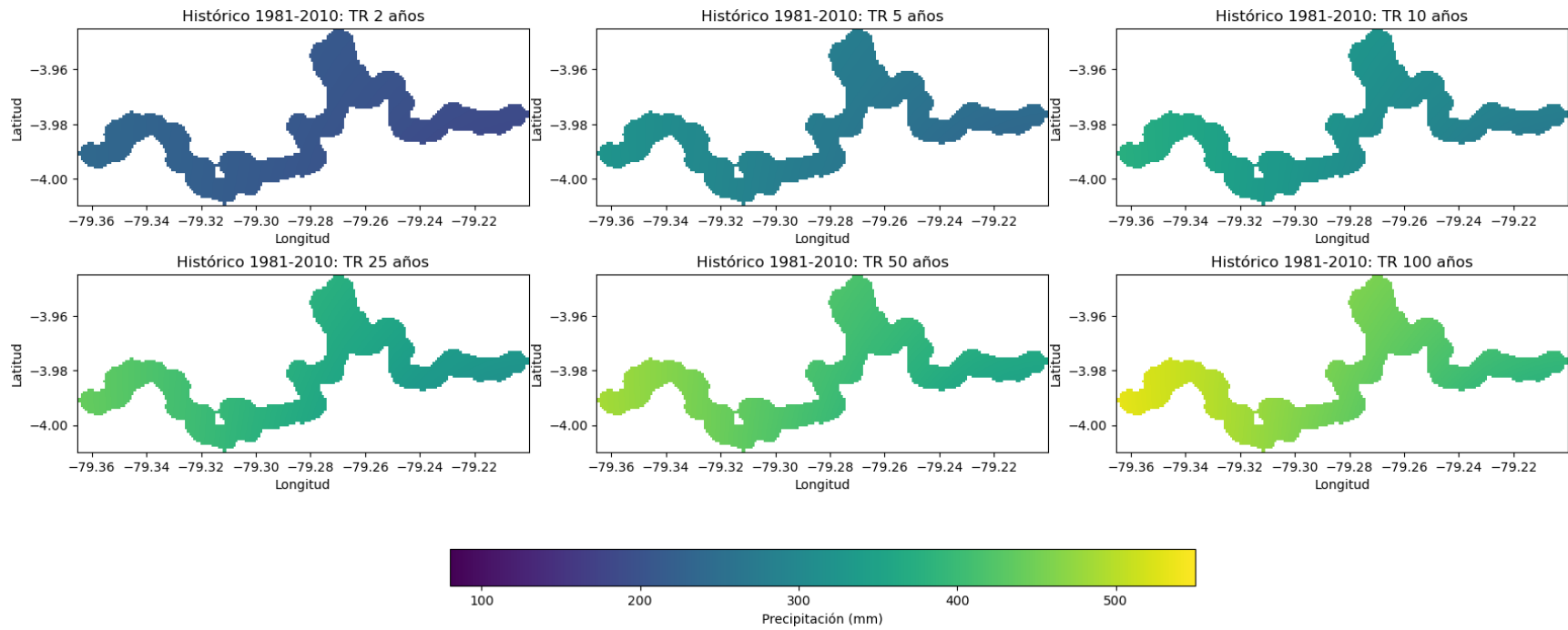


Figura 25. Tasas de Retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años para el área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo.

Los análisis de las tasas de retorno de precipitaciones mensuales para la vía Loja-Catamayo revelan tendencias significativas en la expectativa de precipitación a lo largo de diversos períodos. Comenzando con el período de retorno de 2 años, la precipitación promedio registrada es de 210,00 mm, lo cual sugiere que eventos de esta magnitud son relativamente frecuentes y con poca variabilidad, dada la desviación estándar de 14,33 mm. A medida que se extiende el período de retorno a 5 años, el promedio de precipitación asciende a 277,73 mm, destacando un incremento sustancial en la cantidad de precipitación esperada para estos eventos menos frecuentes.

Para eventos con una frecuencia de retorno de 10 años, el promedio se eleva aún más, alcanzando los 321,29 mm, y la variabilidad también crece, como lo indica una desviación estándar de 26,15 mm. Esto apunta hacia una variabilidad mayor en la intensidad de los eventos de precipitación mensual que ocurren cada década. En el caso de los eventos con un período de retorno de 25 años, se observa un promedio de precipitación de 375,29 mm, con una variabilidad representada por una desviación estándar de 31,27 mm, lo que podría implicar impactos significativos en la gestión del agua y la infraestructura civil.

Mirando aún más a largo plazo, para los períodos de retorno de 50 y 100 años, los promedios de precipitación mensual son de 414,82 mm y 453,71 mm respectivamente, con desviaciones estándar de 34,84 mm y 38,25 mm. Estos datos sugieren que, aunque los eventos son menos frecuentes, la magnitud de la precipitación mensual esperada es considerablemente alta, lo que requiere una atención especial en la planificación urbana y la preparación para emergencias.

Es importante tener en cuenta que estos análisis se basan en datos de precipitación mensual, ya que son los datos disponibles para la región. Aunque sería ideal contar con datos de precipitación máxima en 24 horas para un análisis más detallado de eventos extremos, los patrones observados en las precipitaciones mensuales aún proporcionan información valiosa sobre la variabilidad y magnitud de las lluvias en la vía Loja-Catamayo.

Estos patrones reflejan la importancia de incorporar el análisis de datos climáticos en la toma de decisiones estratégicas y en la implementación de medidas de mitigación para adaptarse a eventos climáticos extremos. El estudio de la precipitación mensual en la vía Loja-Catamayo evidenció un régimen estacional, con mayores lluvias al inicio del año, y proyecta precipitaciones máximas más altas para períodos de retorno más largos. Esta información es valiosa para la planificación y toma de decisiones en la zona, considerando las limitaciones de los datos disponibles.



### 6.1.9.3 Temperatura media multianual en el área de influencia de la vía Loja Catamayo

Los resultados de la Figura 26 mostraron una variación mensual significativa de la temperatura media. En enero, la temperatura media fue de 16,31 °C, que aumentó ligeramente a 16,66 °C en abril. Posteriormente, se produjo un descenso en los meses más fríos, con el valor más bajo de 15,88 °C en julio. A partir de agosto, las temperaturas empezaron a subir de nuevo, alcanzando su punto más alto en octubre, con 16,69 °C, antes de estabilizarse en 16,64 °C en noviembre y 16,59 °C en diciembre.

Estos resultados demuestran un patrón estacional en la temperatura media, con valores más altos de marzo a octubre y temperaturas más bajas durante los meses de invierno, aspecto que se puede visualizar en la Figura 27. Estos patrones de temperatura tienen importantes implicaciones para diversos sectores, como la agricultura, la salud pública y la planificación urbana, especialmente en el contexto del cambio climático.

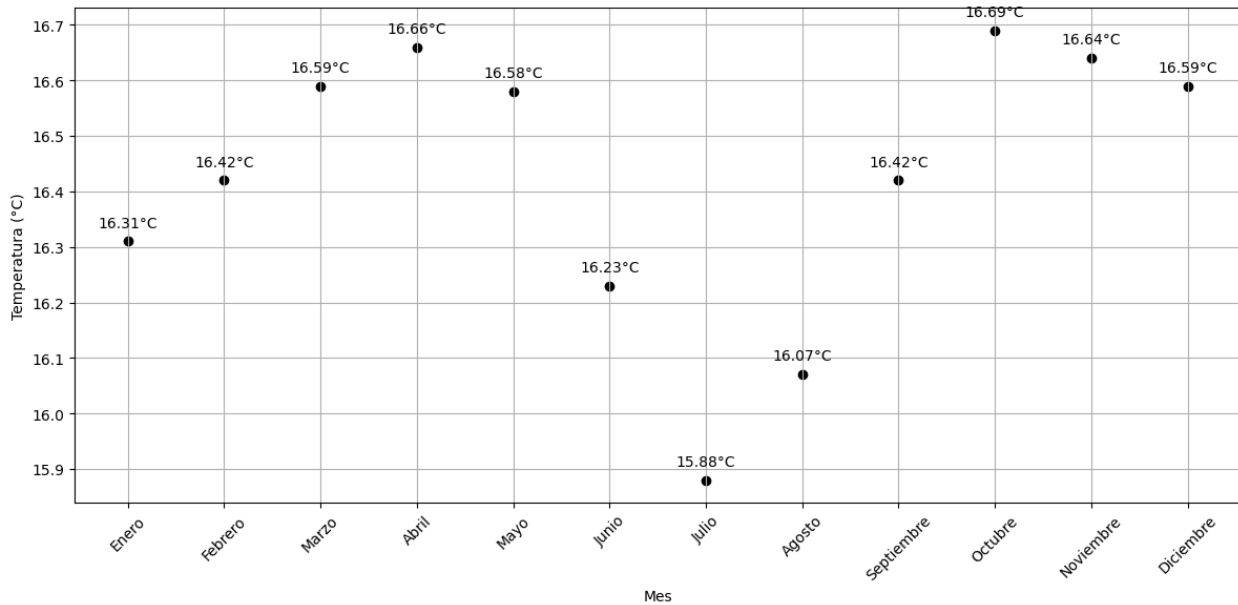


Figura 26. Diagrama de la temperatura media mensual multianual del área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo período 1981 al 2010.

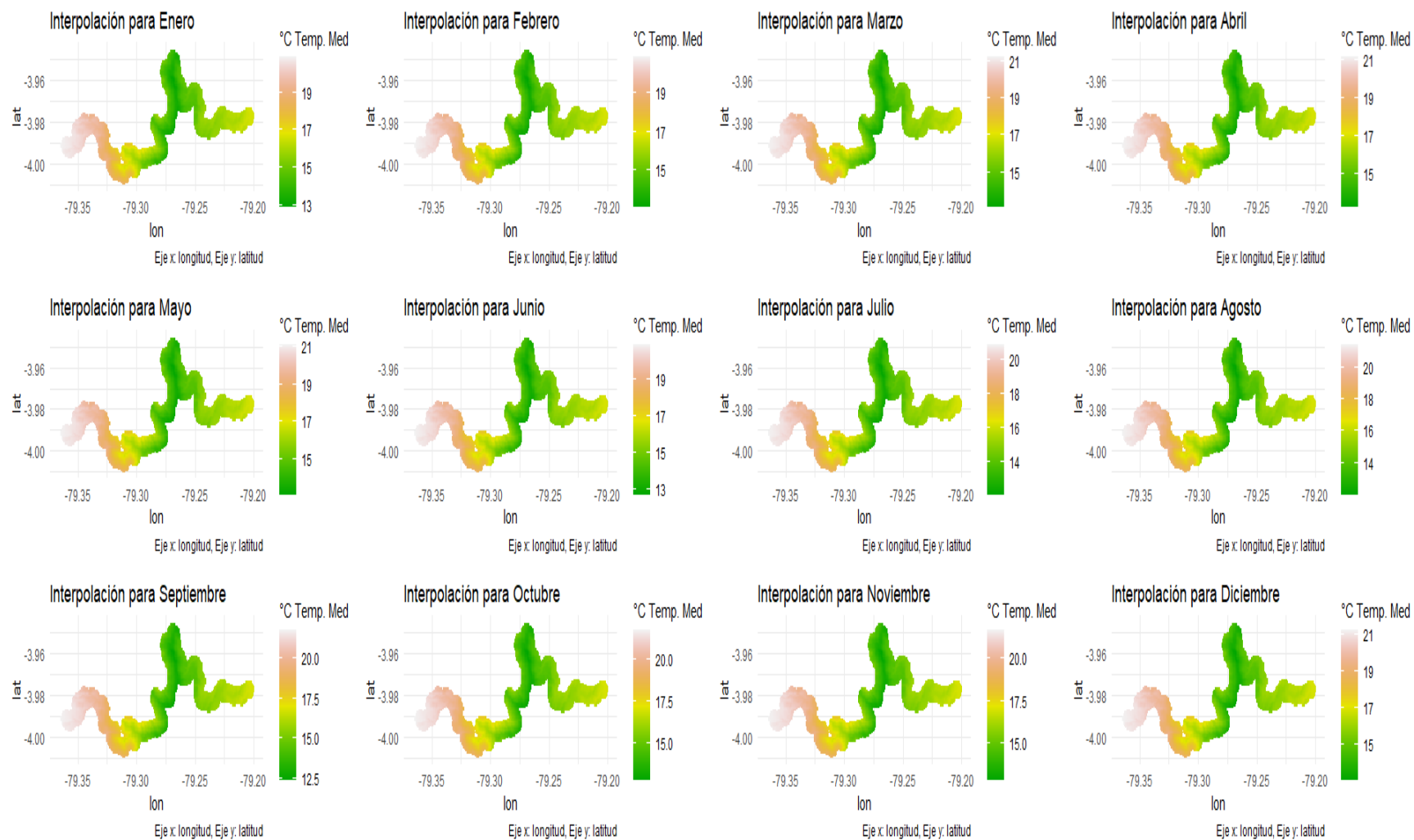


Figura 27. Temperatura media mensual multianual en el área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo.

#### 6.1.9.4 Temperatura media máxima en el área de influencia de la vía Loja-Catamayo

Los resultados mostraron fluctuaciones significativas de las temperaturas máximas a lo largo del año. Enero tuvo una temperatura máxima media de 23,43 °C, que aumentó moderadamente a 23,60 °C en abril, para luego descender a un mínimo de 22,62 °C en julio, antes de aumentar de nuevo y alcanzar un máximo de 24,53 °C en noviembre, y descender ligeramente a 23,46 °C en diciembre, esto se puede observar en las Figuras 28 y 29.

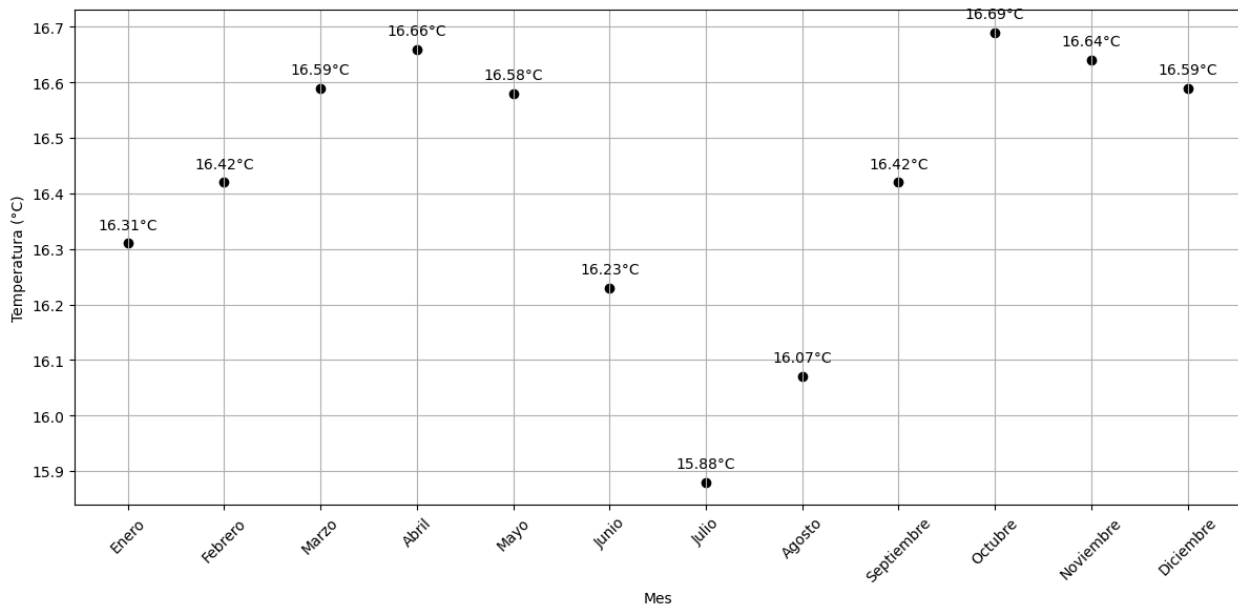


Figura 28. Diagrama de la temperatura media máxima mensual multianual del área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo, período 1981 al 2010.

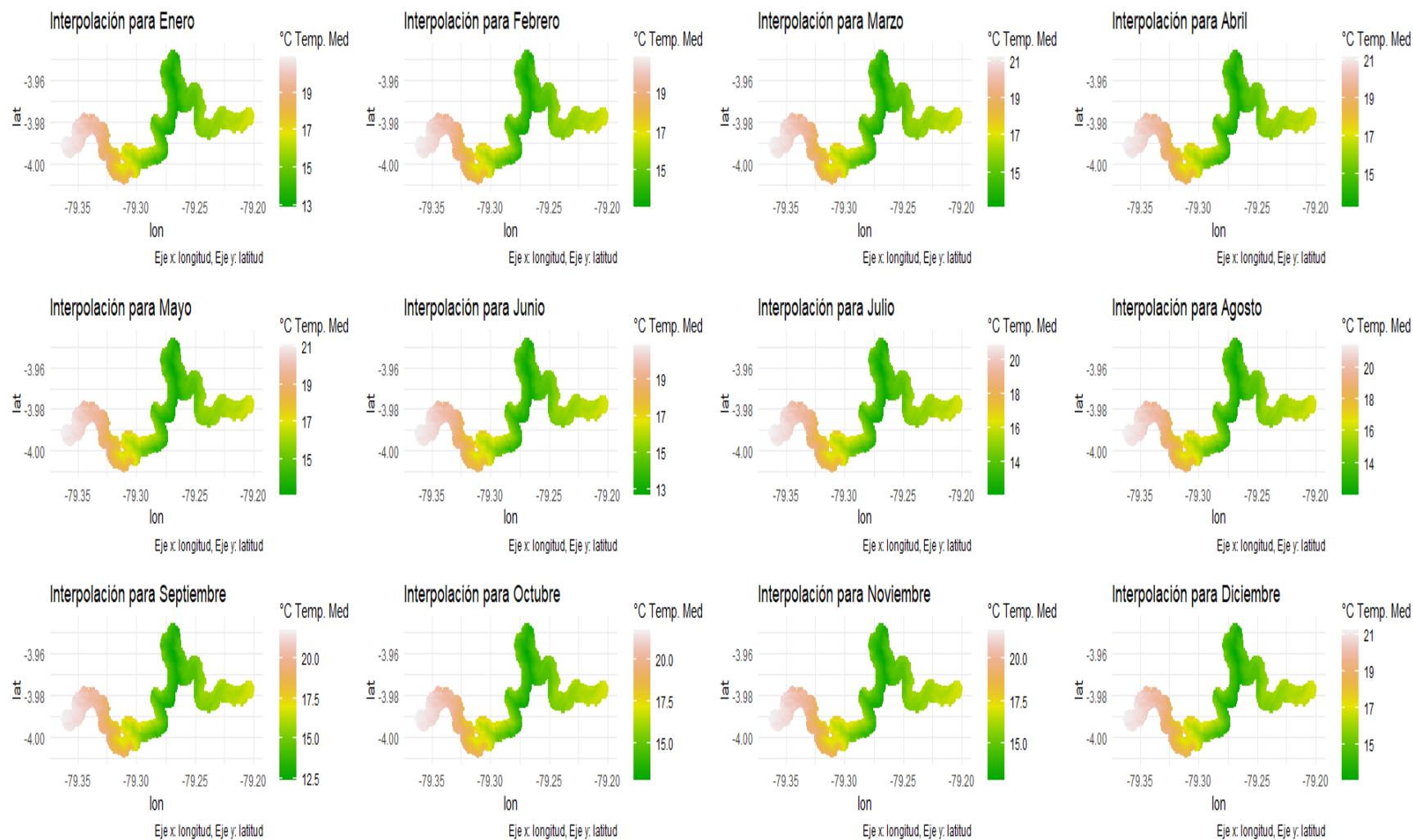


Figura 29. Temperatura media máxima mensual multianual del área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo, período 1981 al 2010.

### 6.1.9.5 Temperatura media mínima en el área de influencia de la vía Loja Catamayo

Los datos revelaron un perfil estacional con una marcada variabilidad de las temperaturas mínimas a lo largo del año. En enero, la temperatura mínima media fue de 11,48 °C, aumentando moderadamente hasta un pico de 11,82 °C en abril, seguido de una tendencia decreciente hasta un mínimo de 10,76 °C en agosto, y una recuperación gradual hasta 11,41 °C en diciembre, esto se puede observar en las Figuras 30 y 31.

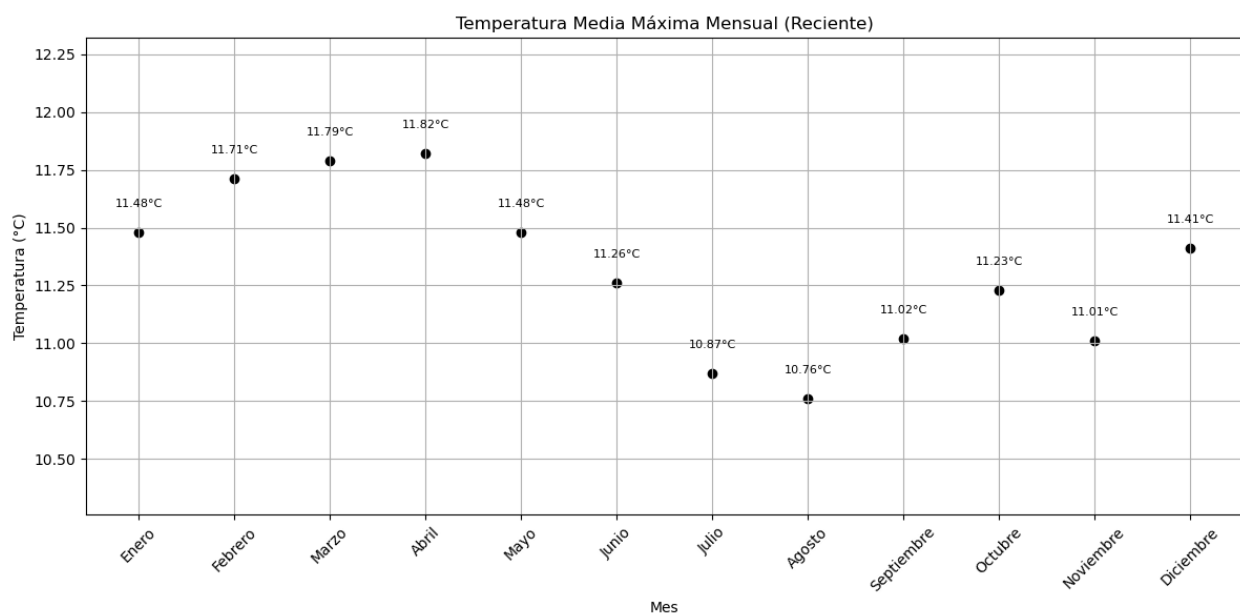


Figura 30. Diagrama de la temperatura media mínima mensual multianual del área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo, período 1981 al 2010.

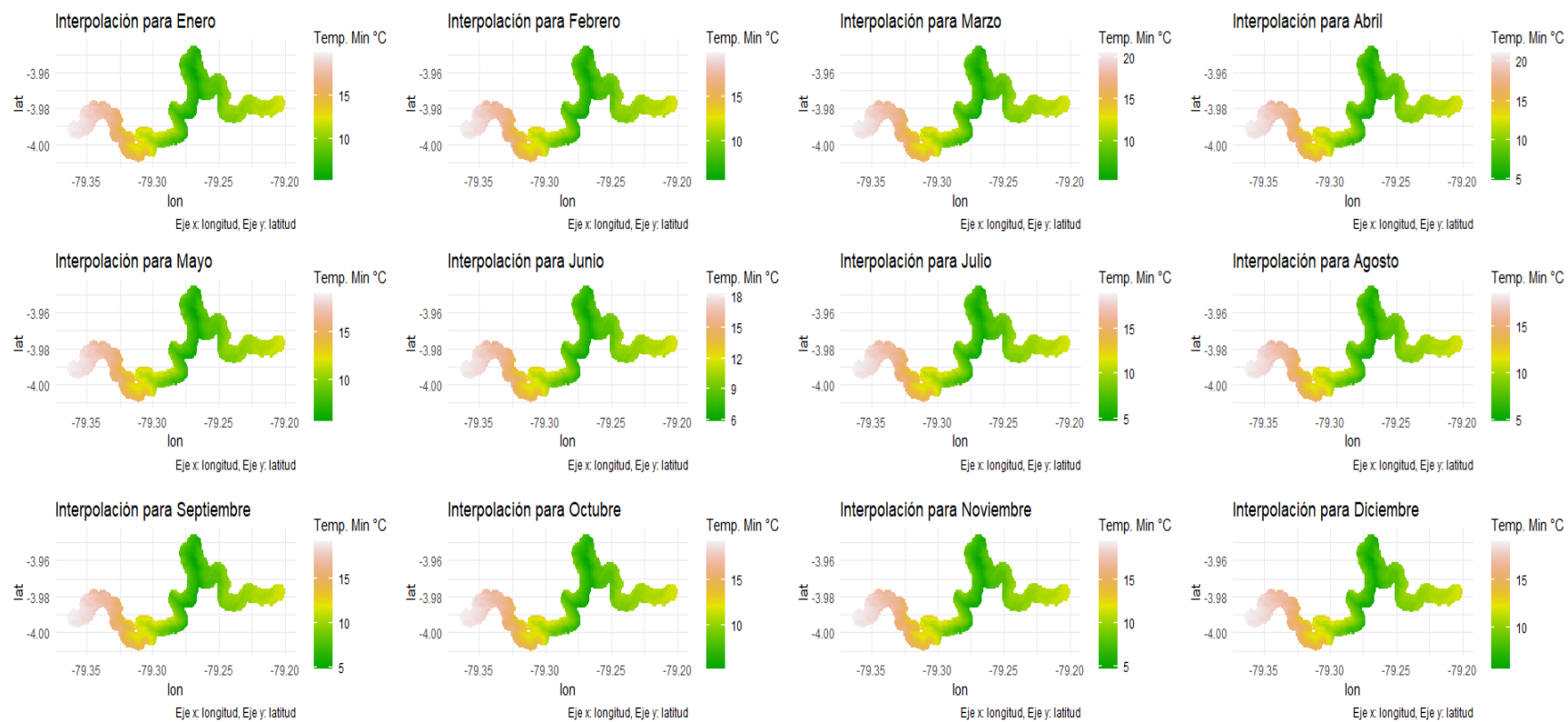


Figura 31. Temperatura media mínima mensual multianual del área de influencia directa de la vía Loja-Catamayo, periodo 1981 al 2010.

### 6.1.10 Cambio climático

En el presente estudio se realizó una rigurosa validación de tres modelos climáticos globales: el BBC-CSM2-MR, el TaiESM1 y el FGOALS-g3. Esta validación se llevó a cabo utilizando el diagrama de Taylor como herramienta fundamental para evaluar la capacidad de estos modelos para representar patrones espaciales y variabilidad temporal en la zona de estudio, tal como se detalla en la Tabla 28.

Tabla 28. Modelos Climáticos Globales.

<b>Modelo</b>	<b>Institución</b>	<b>País</b>
BBC-CSM2-MR	Beijing Climate Center- Climate System Model2- Medium Resolution	China
TaiESM1	Taiwan Earth System Model version 1	China
FGOALS-g3	Flexible Global Ocean- Atmosphere-Land System Model-Grid Point version 3	China

#### 6.1.10.1 Precipitación

Para la variable de precipitación, el modelo BCC-CSM2-MR presentó la mejor correlación de 0,53 con los datos observados, indicando una buena relación lineal (Tabla 29).

Tabla 29. Validación de Modelos Climáticos Globales para Precipitación.

<b>Modelo</b>	<b>Correlación</b>	<b>Coefficiente de Determinación (r<sup>2</sup>)</b>	<b>Error Cuadrático Medio (rmse)</b>
Prec_BCC-CSM2- MR	0,53	0,28	49,73
Prec_FGOALS-g3	0,50	0,25	52,20
Prec_TaiESM1	0,53	0,28	51,31

Además, mostró el coeficiente de determinación más alto de 0,28, significando que explicó una mayor proporción de la variabilidad. También exhibió el error cuadrático medio más bajo con 49,73, reflejando una menor diferencia promedio con las observaciones.

Los diagramas de Taylor (Figuras 32-34) confirmaron que BCC-CSM2-MR<sup>9</sup> tuvo el mejor ajuste para representar los patrones espaciales y temporal de precipitación en la zona de

<sup>9</sup> BCC-CSM2-MR es la segunda versión del modelo climático global del Centro de Clima de Beijing, con una resolución espacial intermedia. Es uno de los modelos de circulación más avanzados usados actualmente para proyectar posibles climas futuros bajo diversos escenarios.

estudio. Por lo tanto, este modelo fue seleccionado para proyecciones climáticas de precipitación futura en el área de la vía.

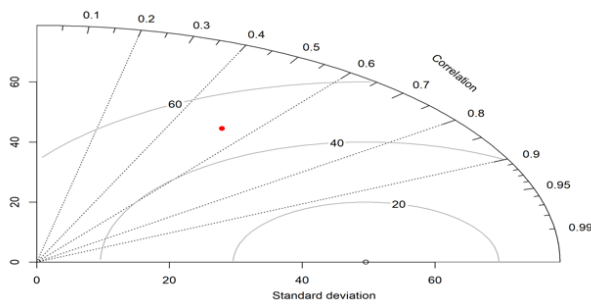


Figura 32. Diagrama de Taylor modelo BCC-CSM2-MR para precipitación.

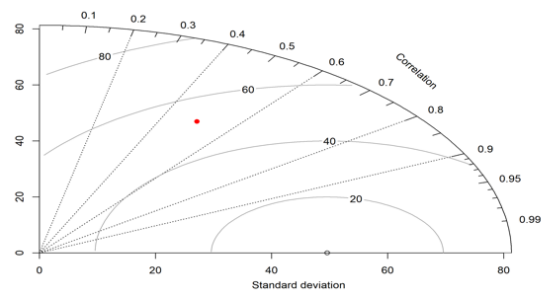


Figura 33. Diagrama de Taylor del modelo FGOALS-g3 para precipitación.

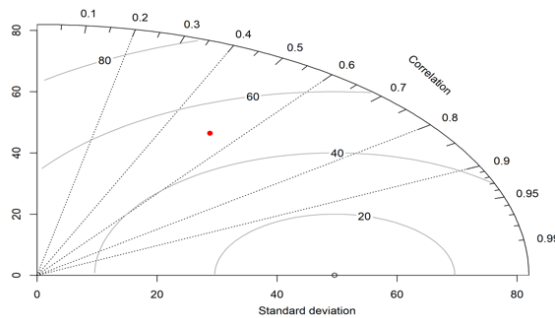


Figura 34. Diagrama de Taylor del modelo TaiESM1 para precipitación.

### 6.1.10.2 Temperatura

En cuanto a la temperatura media mensual, el modelo BCC-CSM2-MR nuevamente mostró el mejor desempeño, con la desviación estándar de comparación más cercana a la referencia y la correlación más alta de 0,86 con los datos observados (Tabla 30).

Tabla 30. Validación de Modelos Climáticos Globales para Temperatura.

Modelo	Desviación Estándar de Referencia	Desviación Estándar de Comparación	Correlación
BCC-CSM2-MR	1,64	2,93	0,86
FGOALS-g3	1,64	2,94	0,87
TaiESM1	1,64	3,12	0,82



Los diagramas de Taylor (Figuras 35-37) corroboraron su mayor capacidad para replicar la variabilidad térmica en la región. Debido a esto, este modelo fue seleccionado para proyecciones de temperatura media mensual en la zona de la vía Loja-Catamayo.

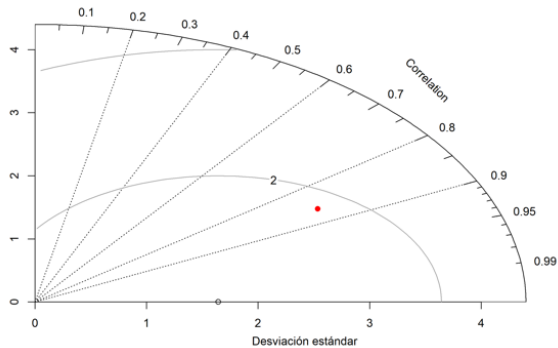


Figura 35. Diagrama de Taylor modelo BCC-CSM2-MR para temperatura media.

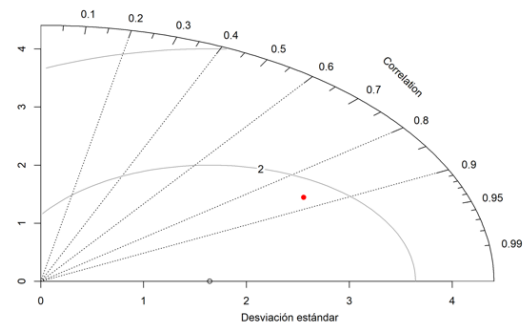


Figura 36. Diagrama de Taylor del modelo FGOALS-g3 para temperatura media

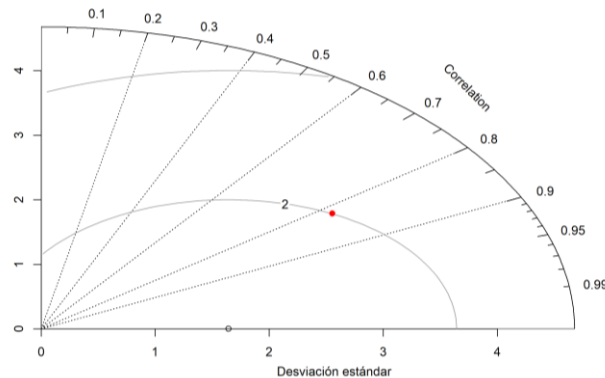


Figura 37. Diagrama de Taylor del modelo TaiESM1 para temperatura media.

El modelo BCC-CSM2-MR demostró la mayor precisión para representar precipitación y temperatura media mensual, siendo seleccionado para proyecciones climáticas futuras en el marco del análisis de vulnerabilidad de la vía ante el cambio climático.

### ***6.1.11 Análisis de variables climáticas, precipitación, temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima.***

Los resultados obtenidos a través de este estudio proyectan un incremento gradual en la precipitación media multianual en la región durante el siglo XXI, observándose aumentos aún más notorios bajo el escenario de altas emisiones SSP585. Al mismo tiempo, se prevé un calentamiento significativo en las temperaturas máximas, medias y mínimas anuales. Para mediados de siglo, se anticipan aumentos proyectados de 1-2 °C en la temperatura máxima media anual, de 1,5-2 °C en la temperatura media anual, y de 1,5-2,7 °C en la temperatura mínima media anual, dependiendo del escenario climático.

Estos cambios combinados en la precipitación y las temperaturas tienen el potencial de generar impactos significativos en los ecosistemas naturales y en la infraestructura existente. En consecuencia, se requerirán estrategias integrales de adaptación para hacer frente a las condiciones climáticas cambiantes que se proyectan para la región en el futuro. Estas estrategias deberán abordar de manera efectiva tanto la gestión del agua como la protección de la infraestructura y la seguridad de la población, a medida que la región se adapta a un clima en constante evolución.

#### **6.1.11.1 Precipitación.**

La evaluación diacrónica de los patrones de precipitación en la zona de influencia directa de la vía Loja-Catamayo, para el intervalo comprendido entre 1980 y 2010, ha revelado un ciclo pluviométrico distintivo. Se identificaron picos de precipitación máximos en los meses de febrero a abril, seguidos por un período de marcada aridez que se extiende de junio a septiembre. No obstante, una comparativa con las proyecciones efectuadas para los escenarios de cambio climático SSP370 y SSP585, para los periodos futuros de 2015-2045 y 2046-2075, manifiesta una inclinación hacia la intensificación de las lluvias mensuales. Esta tendencia es particularmente notoria en la estación de transición y comienzos del periodo húmedo, abarcando de octubre a marzo.

El análisis cuantitativo de las variaciones en los patrones de precipitación, ilustrados en la Figura 38, pone de relieve transformaciones climáticas significativas en la zona de influencia de la carretera Loja-Catamayo. Tomando como línea base el promedio histórico de 1981-2010, se facilita la comparación con las proyecciones climáticas de los escenarios SSP370 y SSP585.

Dos períodos de interés se pueden distinguir: 2015-2045 y 2046-2075. Durante 2015-2045, los mayores incrementos en la precipitación se concentran en los meses de transición (marzo, abril, mayo, septiembre y octubre), con aumentos de hasta un 20%. En contraste, en los meses intermedios se advierten descensos de hasta un 15 %, presagiando un patrón de mayor variabilidad climática.

Ya en 2046-2075, la tendencia dominante es de intensificación general de las precipitaciones, especialmente en primavera y otoño, con crecimientos superiores al 35 %. Este comportamiento es indicio de una estacionalidad más acusada, con estiajes y temporadas lluviosas más pronunciados.

En consecuencia, la zona muestra una evolución hacia eventos extremos más frecuentes, tanto de sequías como de inundaciones. Este panorama subraya la necesidad de integrar proyecciones climáticas en el diseño y gestión de infraestructura vial regional para mitigar riesgos.

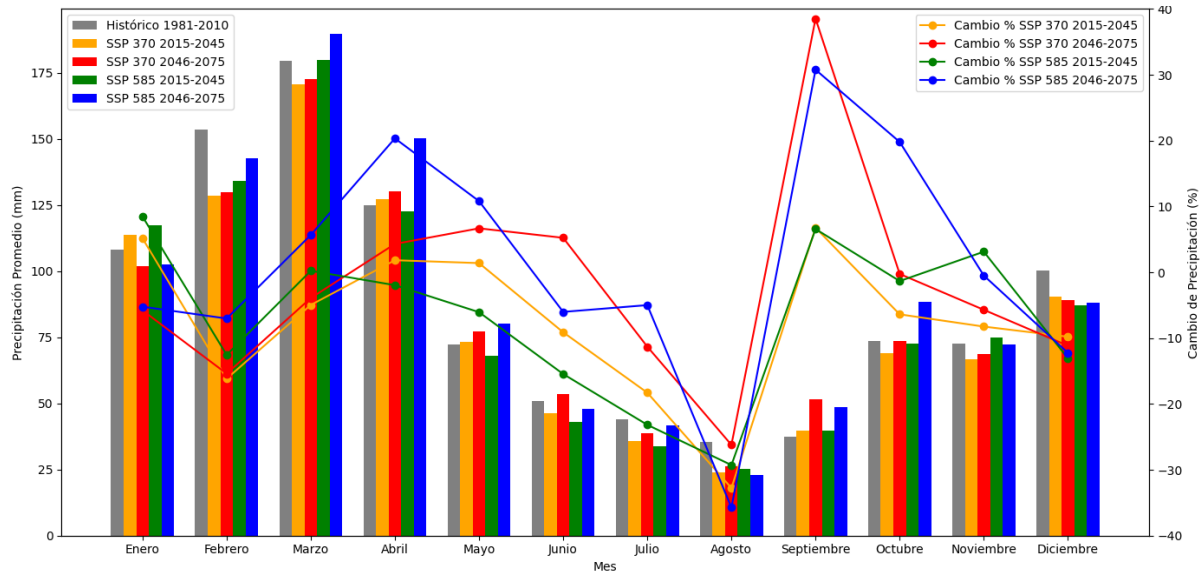


Figura 38. Precipitación promedio mensual y porcentaje de cambios para el histórico 1981 al 2010, escenarios SSP 370 Y SSP 585, periodos 2015 al 20145 y 2046 al 2075 del área de influencia directa de la vía Loja – Catamayo.

Estos cambios en el patrón de lluvias indican un incremento en la intensidad y frecuencia de eventos extremos en el área de estudio. Las tasas de retorno corroboraron la mayor frecuencia e intensidad de eventos extremos de precipitación (Figuras 39 a 41).

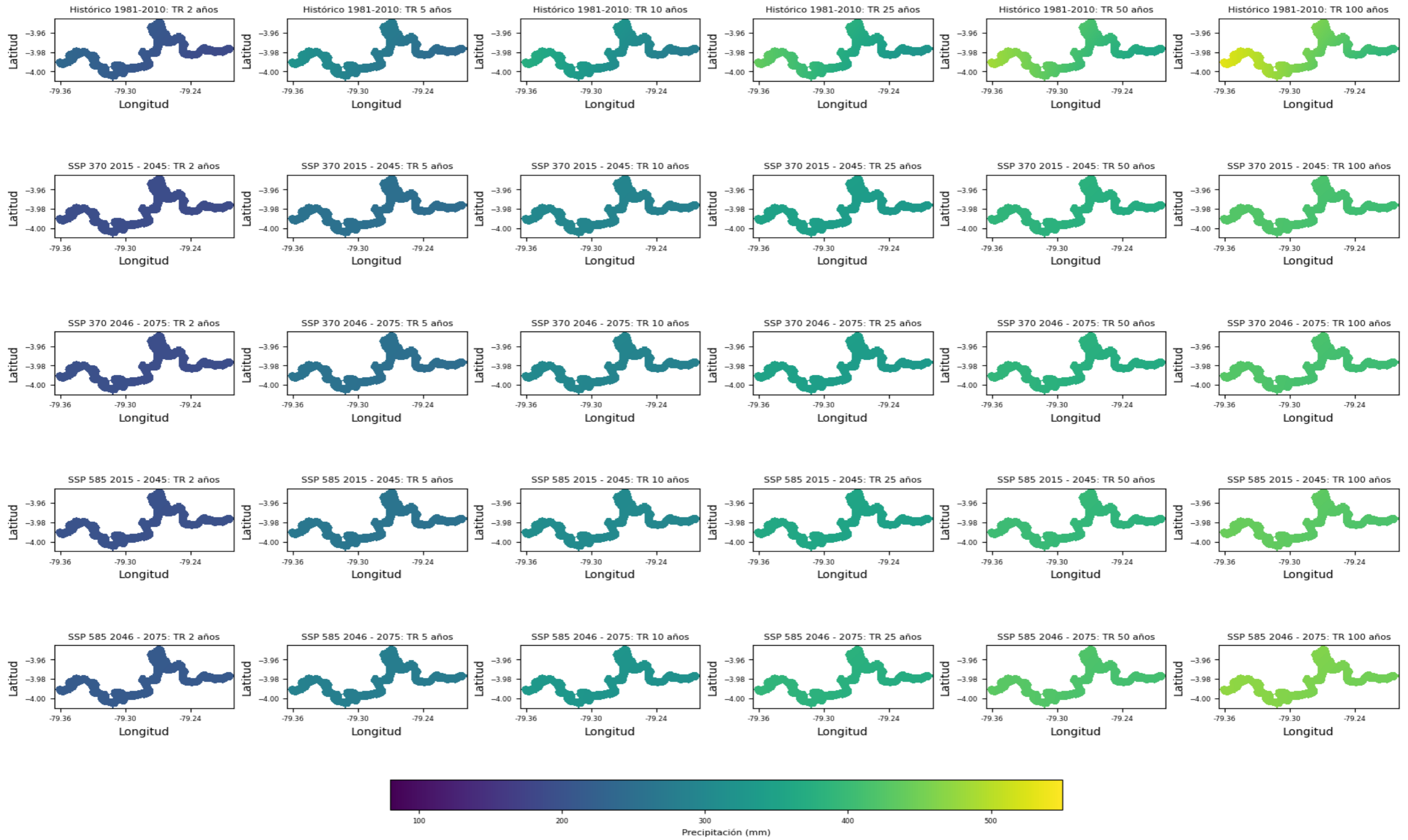


Figura 39. Mapas de proyecciones de precipitación para los periodos y escenarios del histórico y proyectado para la vía Loja-Catamayo.

La serie de rasters generados ofrece una visualización detallada de los niveles de retorno de precipitación para el tramo Loja-Catamayo de la Red Vial Estatal E-35, abarcando un análisis histórico y proyecciones bajo escenarios de cambio climático SSP370 y SSP585.

A partir de los datos históricos (1981-2010), se identifica un régimen pluviométrico con su pico más alto en períodos de retorno largos, reflejando la intensidad de los eventos de lluvia que se pueden esperar en lapsos de tiempo extensos. Estos patrones de precipitación indican una tendencia hacia eventos más extremos, sugiriendo una necesidad de reforzar la planificación en la gestión del riesgo de desastres y la infraestructura vial.

Las proyecciones bajo el escenario SSP370 para los períodos 2015-2045 y 2046-2075 muestran un incremento en los niveles de precipitación de 100 a 500 mm, especialmente para los períodos de retorno más largos.

Bajo el escenario SSP585, que contempla un nivel más alto de emisiones de gases de efecto invernadero, se proyecta un escenario aún más desafiante. Para el período 2015-2045, el incremento en los niveles de precipitación es mayor en comparación con el SSP370, y este patrón se intensifica para el período 2046-2075 (Ver Figura 40). Esto resalta la urgencia de adoptar medidas de adaptación y mitigación frente a los impactos del cambio climático.

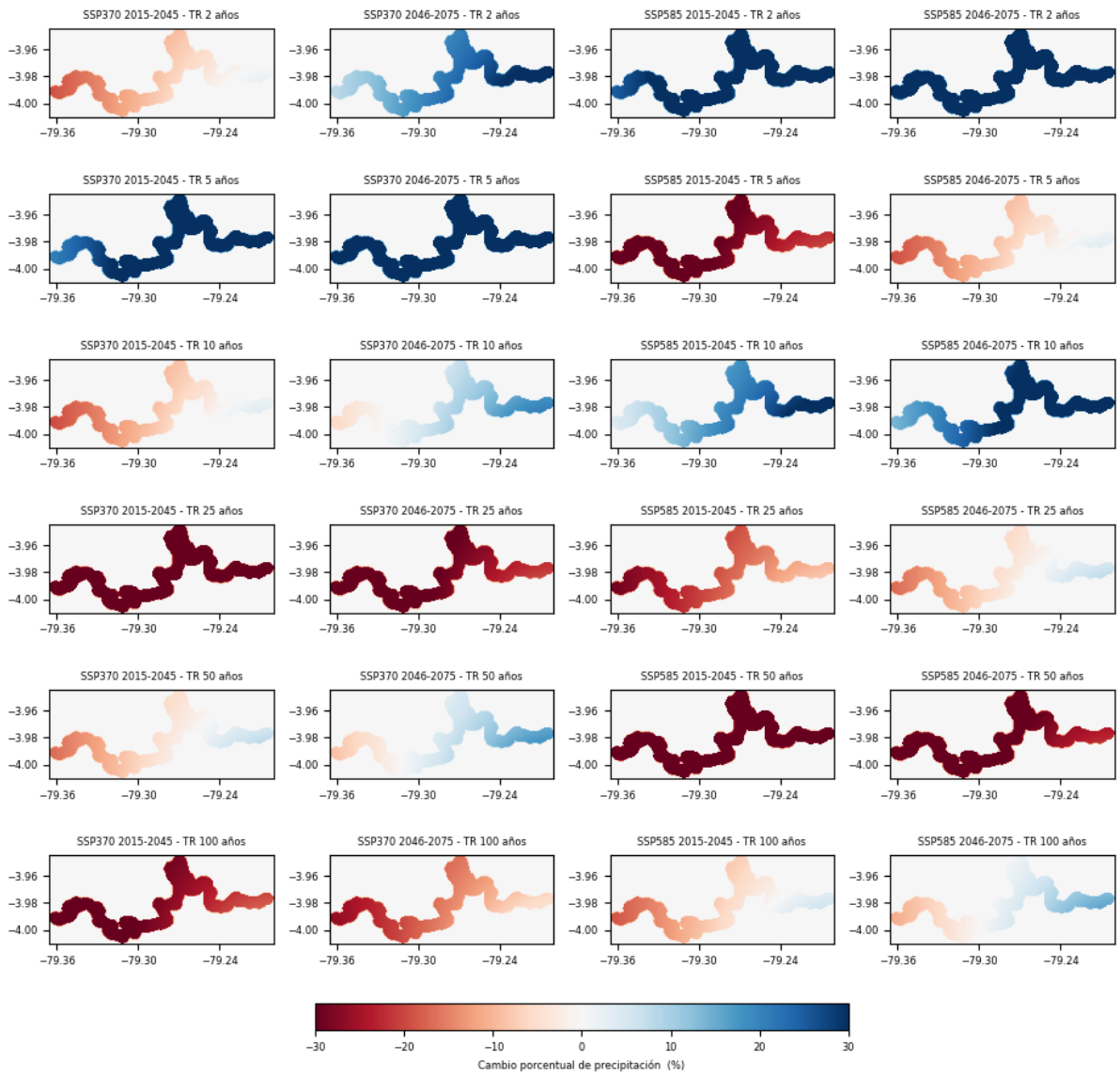


Figura 40. Mapas *Rasters* de variación porcentual de precipitación para la Red Vial E-35 (Loja – Catamayo) bajo escenarios de cambio climático SSP 370 y SSP 585 en períodos de retorno de 2 a 100 años.

En cuanto a la precipitación media anual, los resultados apuntan a un aumento gradual durante el siglo XXI, con incrementos más notorios bajo el escenario SSP585 de altas emisiones (15 % para 2046-2075 respecto al período base) (Figuras 41, 42 y 43).

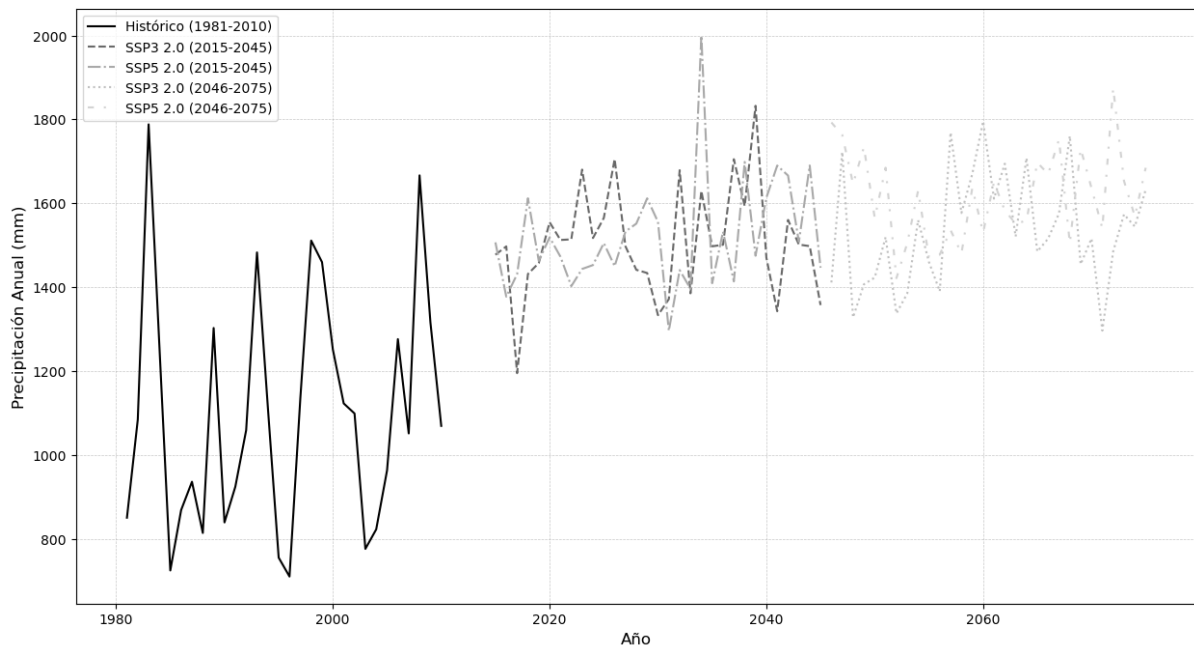


Figura 41. Diagrama de la precipitación media multianual del histórico 1981 al 2010 y, de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los períodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

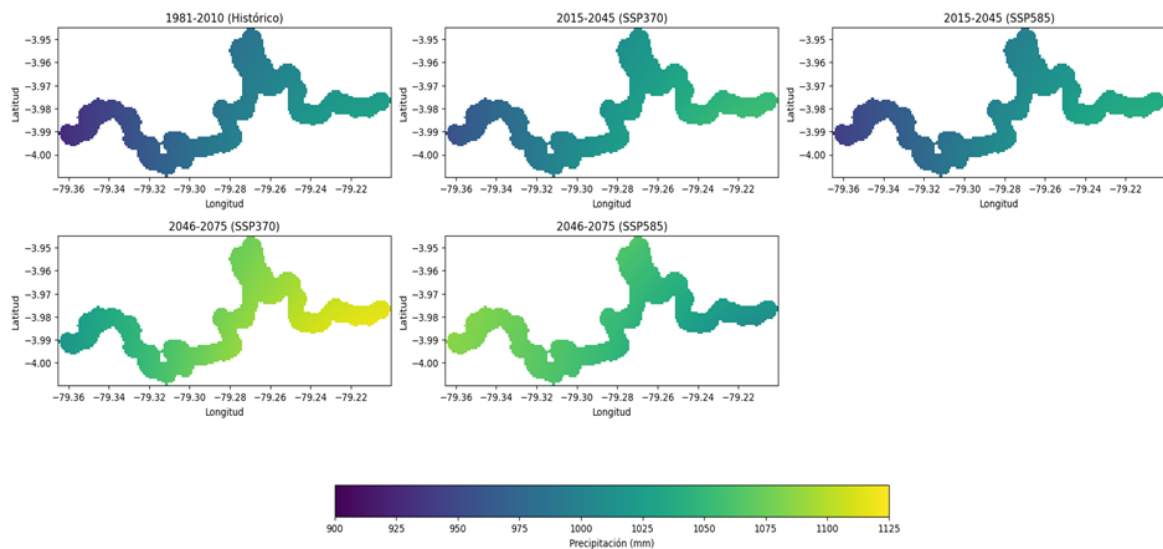


Figura 42. Precipitación anual del histórico 1981 al 2010 y de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los períodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075 para el área de influencia directa (AID) de la vía Loja-Catamayo.

En el estudio del corredor vial Loja-Catamayo, se observó un aumento significativo en la precipitación media anual a lo largo de las décadas analizadas. Durante el período histórico de 1981 a 2010, la precipitación media anual fue de 1052,96 mm. Proyecciones futuras bajo

los escenarios climáticos SSP370 y SSP585 indican un aumento continuo. Para 2015-2045, bajo el escenario SSP370, el promedio aumentó a 1 119,03 mm, y bajo el SSP585, a 1 131,84 mm. Esta tendencia ascendente se mantiene para el período 2046-2075, donde los promedios alcanzan los 1 146,73 mm y 1 208,65 mm para los escenarios SSP370 y SSP585, respectivamente.

Estos resultados sugieren un incremento notable en la precipitación para el corredor vial, lo que podría tener implicaciones significativas en la planificación de infraestructura y la gestión de recursos hídricos en el corredor Loja-Catamayo. La adaptación a estas condiciones cambiantes será crucial para mitigar posibles impactos negativos relacionados con el aumento de la precipitación, como inundaciones o deslizamientos de tierra. La investigación destaca la importancia de considerar estos cambios climáticos en la toma de decisiones a largo plazo para la región.

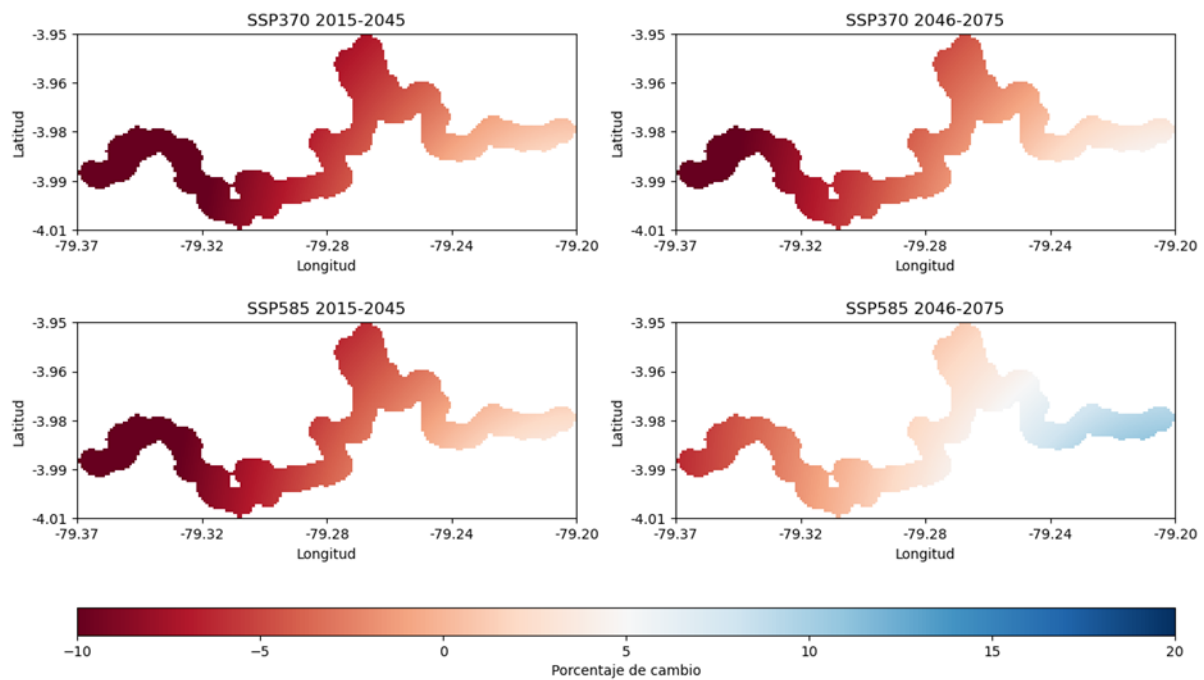


Figura 43. Porcentaje de cambios de la precipitación anual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los períodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

La evaluación de los cambios en la precipitación para el corredor vial Loja-Catamayo revela tendencias de incremento bajo los escenarios de cambio climático estudiados. Durante el período de 2015 a 2045, bajo el escenario SSP370, se proyecta un aumento medio del 5 %, reflejando una variabilidad entre el -10 % y el 5 %. Esta tendencia se intensifica en el período de 2046 a 2075, donde el aumento medio previsto es del 6 %, indicando una mayor variación en la precipitación que puede influir en la planificación de la infraestructura y la gestión de recursos hídricos de la región.



El escenario SSP585 presenta una perspectiva más pronunciada. Para 2015-2045, se anticipa un cambio medio del 6 %, que se intensifica drásticamente para 2046-2075, alcanzando un cambio medio del 14 %. Estos resultados destacan un potencial escenario de riesgo elevado, con implicaciones en la frecuencia e intensidad de eventos extremos, como inundaciones y deslizamientos de tierra, que podrían afectar significativamente la sostenibilidad y seguridad del corredor vial Loja-Catamayo. La necesidad de estrategias de adaptación y mitigación se hace patente para enfrentar los desafíos que el cambio climático podría presentar en las próximas décadas.

### 6.1.11.2 Temperatura media máxima multianual

Los resultados mostraron una temperatura máxima media anual de 24,81 °C en el período histórico 1981-2010, lo que representa un aumento de 1 °C desde niveles preindustriales (Figura 44).

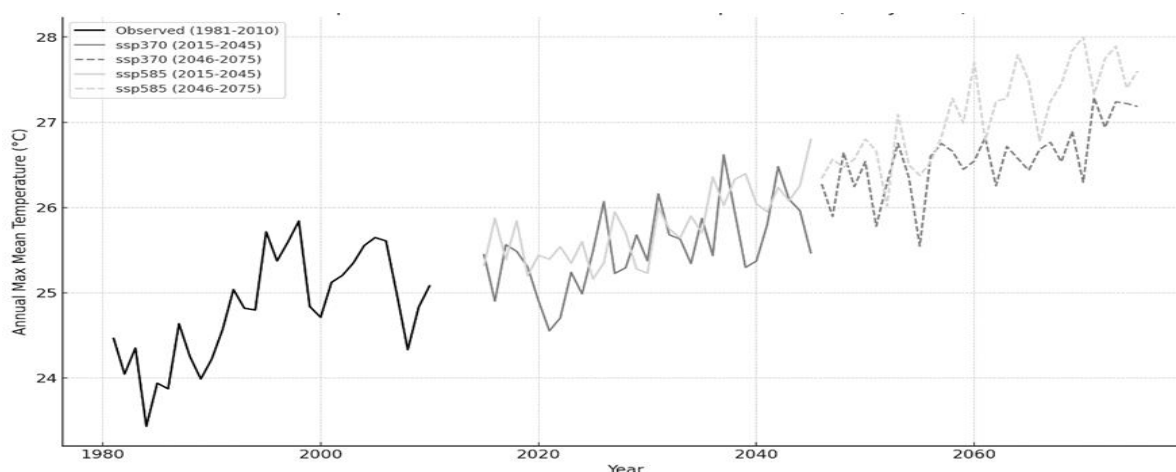


Figura 44. Diagrama de la temperatura media máxima multianual del histórico 1981 al 2010 y de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los períodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

Bajo el escenario SSP370 se proyecta un incremento adicional a 25,53 °C en 2015-2045 y 26,57 °C en 2046-2075. El escenario SSP585 muestra un mayor calentamiento, alcanzando 25,78 °C y 27,09 °C para esos períodos (Figuras 45 y 46). Esto resalta una tendencia de calentamiento continuo, que requerirá medidas de mitigación y adaptación para evitar impactos severos.

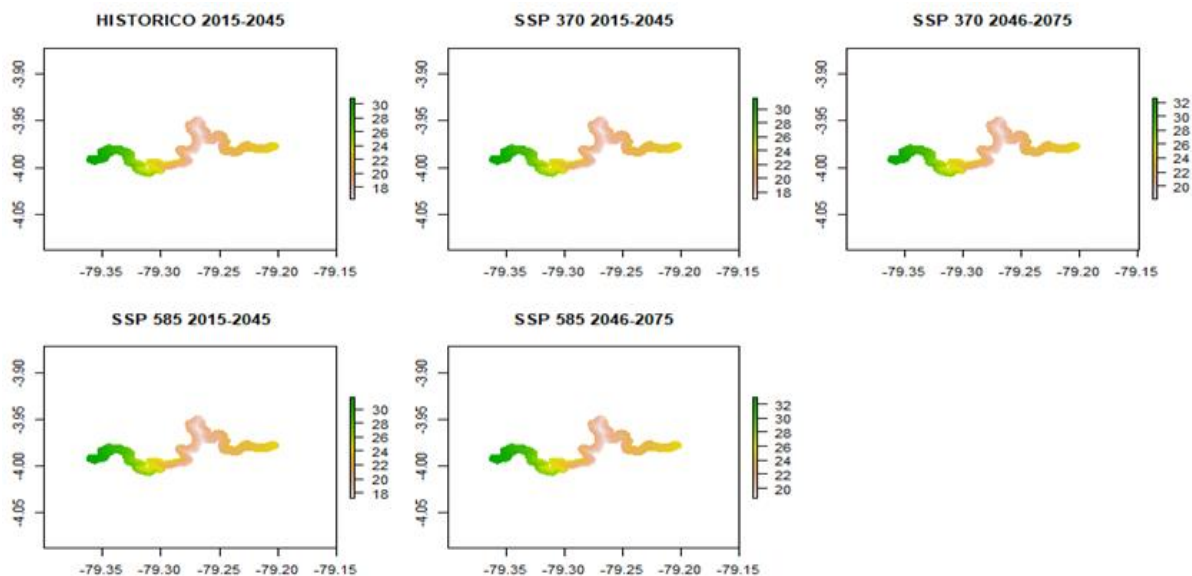


Figura 45. Temperatura media máxima multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

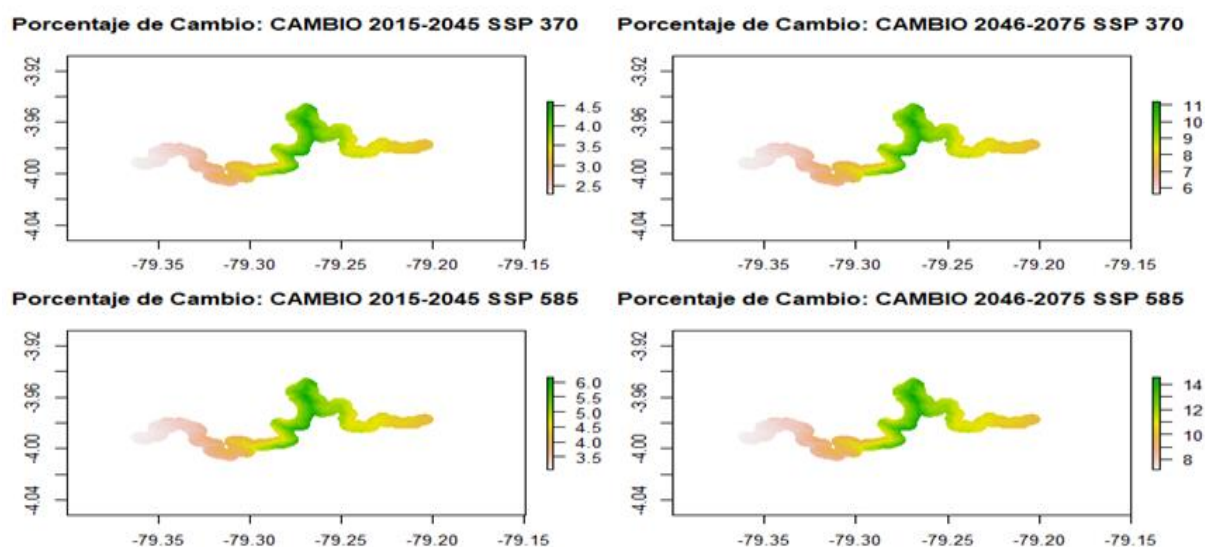


Figura 46. Porcentaje de cambios de la temperatura media máxima multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

### 6.1.11.3 Temperatura media multianual

La temperatura media anual fue de 19,48 °C en el período histórico 1981-2010. El escenario SSP370 prevé un aumento a 20,19 °C en 2015-2045 y 21,34 °C en 2046-2075. El escenario SSP585 muestra un calentamiento mayor, llegando a 20,30 °C y 21,60 °C (Figura 47).

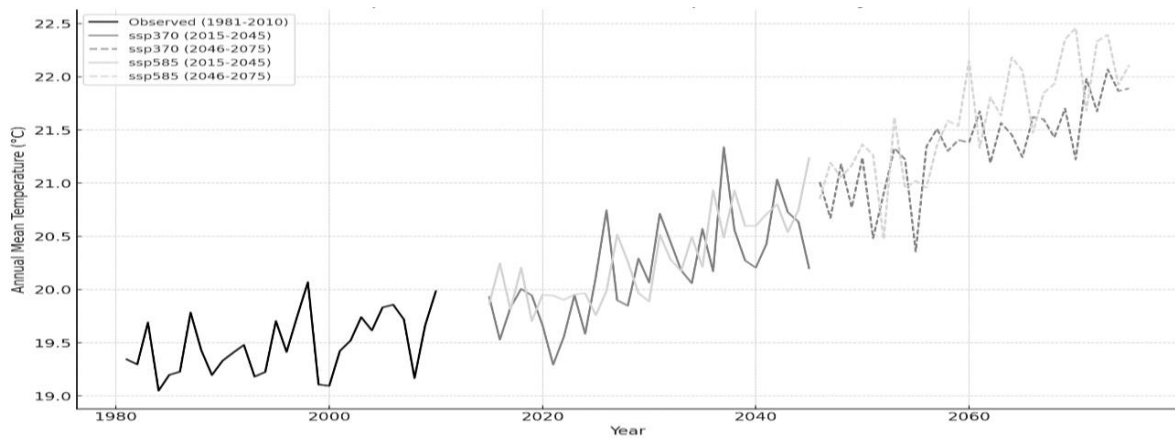


Figura 47. Diagrama de la temperatura media multianual del histórico 1981 al 2010 y de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

Esto indica un fuerte calentamiento continuado, que bajo SSP585 implica un aumento de más de 2 °C para mediados de siglo (Figuras 48 y 49). Se necesitarán esfuerzos en mitigación y adaptación.

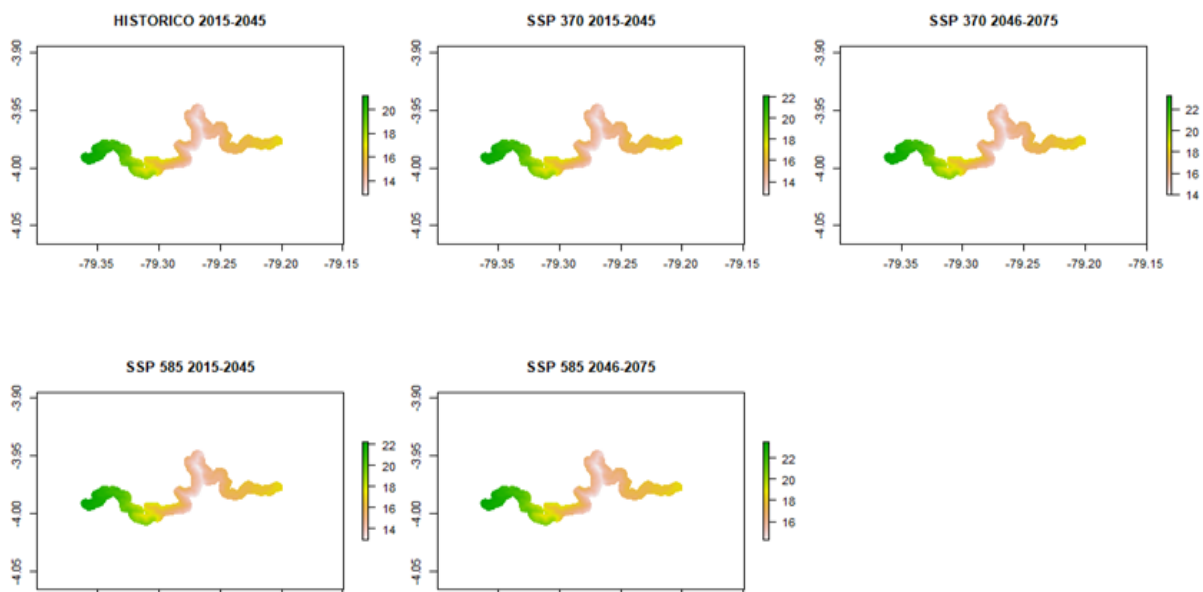


Figura 48. Temperatura media mínima multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

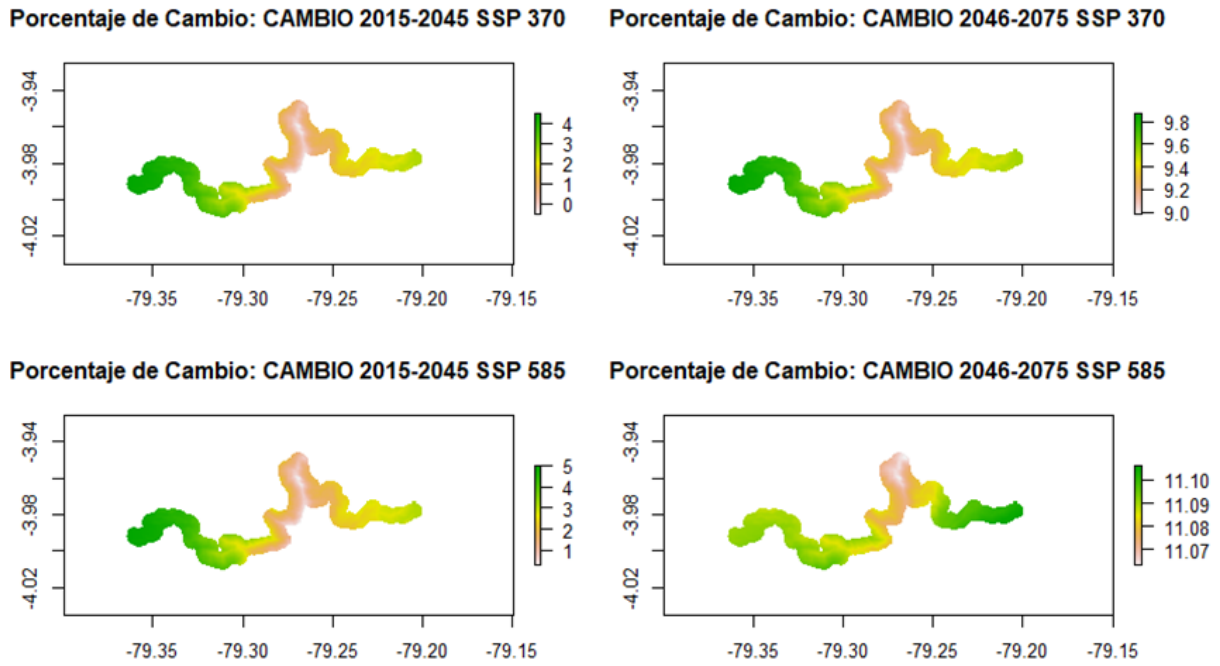


Figura 49. Porcentaje de cambios de la temperatura media multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

#### 6.1.11.4 Temperatura media mínima multianual

La temperatura mínima media anual fue 9,87 °C en 1980-2010. El escenario SSP370 predice aumentos a 11,30 °C en 2015-2045 y 12,58 °C en 2046-2075. El escenario SSP585 es similar, con temperaturas de 11,25 °C y 12,58 °C (Figura 50).

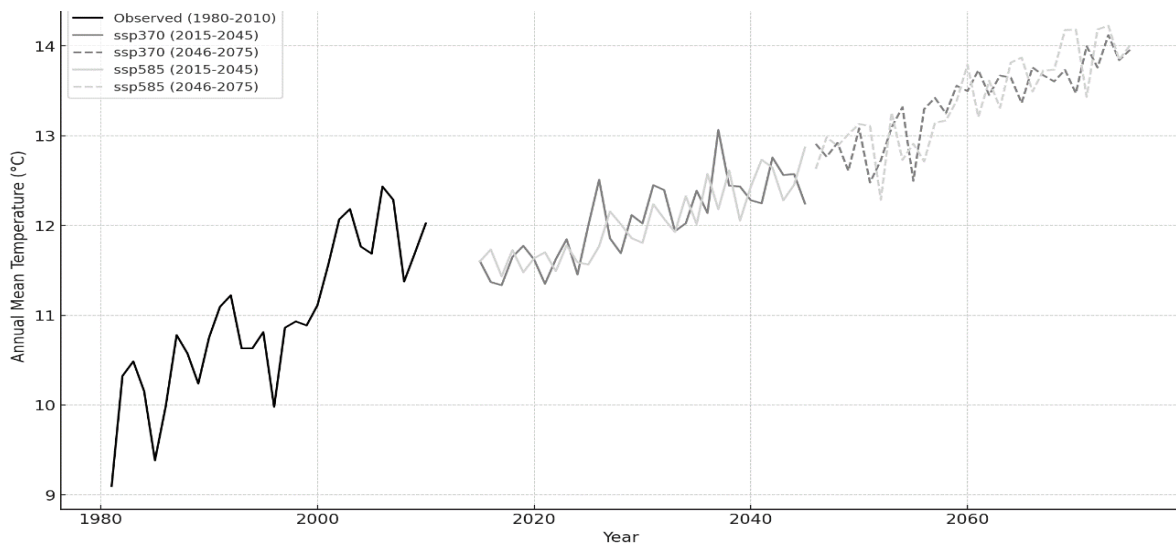


Figura 50. Diagrama de la Temperatura media mínima multianual del histórico 1981 al 2010 y de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

Esto muestra un fuerte calentamiento, con incrementos de 1,5 °C a 2,7 °C proyectados para mediados de siglo (Figuras 51 y 52). Se requerirán medidas ante este acelerado calentamiento.

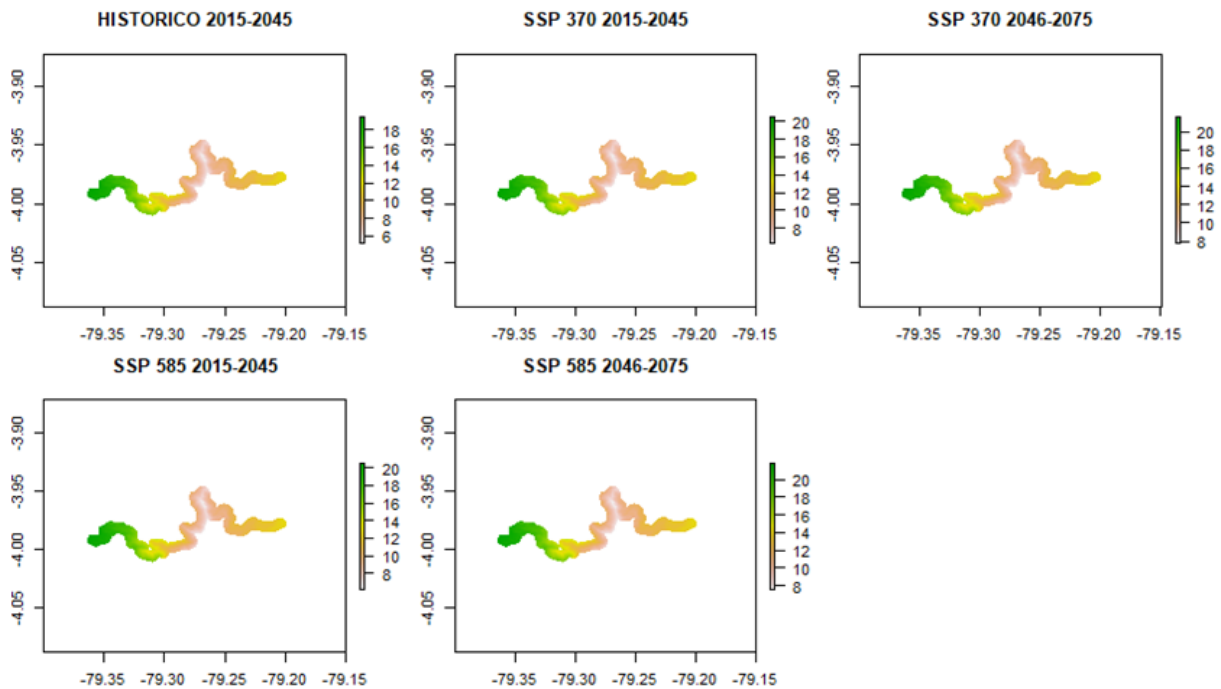


Figura 51. Temperatura media mínima multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

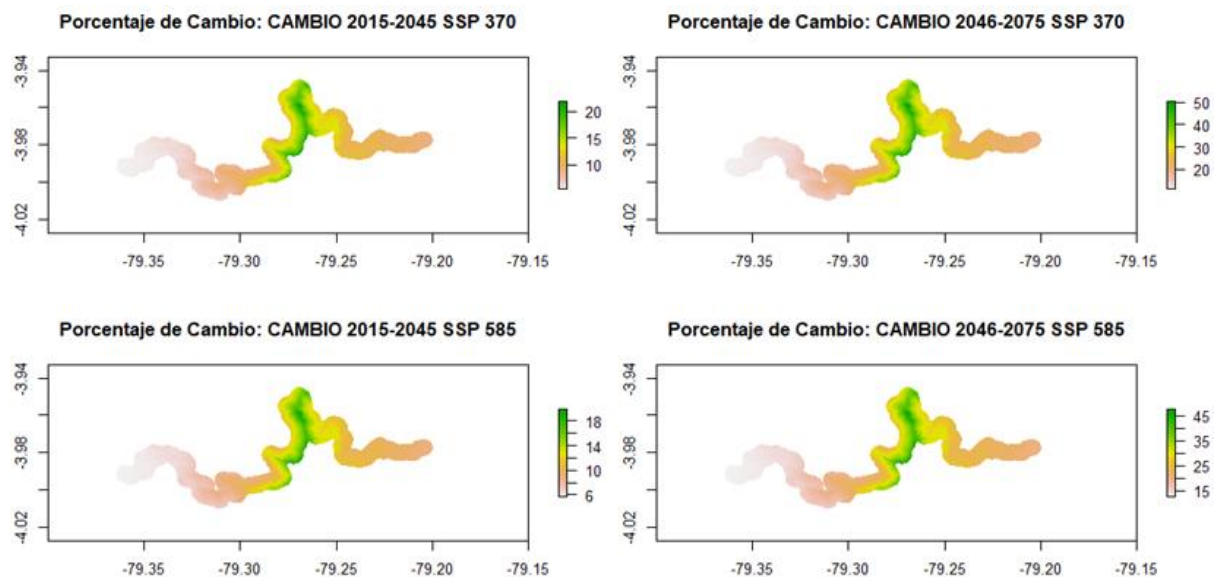


Figura 52. Porcentaje de cambios de la temperatura media mínima multianual de los escenarios SSP 370 y SSP 585 para los periodos del 2015 al 2045 y 2046 al 2075.

## **6.2 Vulnerabilidad actual y futura del tramo Loja - Catamayo de la RVE 35 a los efectos del cambio climático.**

Los resultados obtenidos del análisis revelan que la carretera E-35 entre Loja y Catamayo, de 32,4 km en terrenos accidentados y con un alto flujo vehicular proyectado, enfrenta serios desafíos climáticos que comprometen su resiliencia. En primer lugar, se describió la situación actual del tramo vial, identificando zonas críticas con alta sensibilidad a eventos extremos como derrumbes e inundaciones con la información recopilada del Ministerio de Transporte y Obras Públicas.

Además, con la información de los indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, se efectuó un análisis de la longitud de los segmentos viales y su vulnerabilidad ante dos escenarios climáticos futuros (SSP370 y SSP585) para los períodos 2015-2045 y 2046-2075. Los hallazgos evidencian un aumento de la vulnerabilidad de la vía, especialmente bajo el escenario SSP585, resaltando la necesidad de implementar urgentemente medidas de adaptación y un enfoque integral en la planificación estratégica de esta infraestructura ante el clima cambiante. Estos resultados aportan información valiosa para comprender los desafíos climáticos de la ruta Loja-Catamayo y orientar adecuadamente la toma de decisiones para su gestión sostenible a futuro.

### ***6.2.1 Caracterización del Tramo Loja - Catamayo***

El tramo Loja-Catamayo de la vía E-35 tiene una longitud total de 32,4 km, atravesando un terreno predominantemente ondulado. Cuenta con un ancho de calzada de 7,3 metros, distribuido en dos carriles de 3,65 m cada uno. De acuerdo con proyecciones informadas por la Subsecretaría Zonal 7, se espera un volumen de tráfico promedio de 5 377 vehículos por día para el año 2023 en este importante corredor vial, que conecta las ciudades de Loja y Catamayo.

### ***6.2.2 Amenazas climáticas al tramo Loja Catamayo***

La vía Loja-Catamayo enfrenta diversas amenazas ante los efectos del cambio climático. Una de las más críticas son las lluvias intensas, las cuales, debido a la falta de mantenimiento en la infraestructura hídrica en algunos tramos, pueden provocar el desbordamiento e inundación de la carretera, así como deslizamientos y erosión en los taludes adyacentes. Varios puntos críticos han sido identificados donde se ha detectado inestabilidad en los taludes, como en los kilómetros 10+020 (altura de corte 17,14 m), 11+420 (25,80 m), 14+700 (16,11 m), 17+300 (32,90 m) y 23+315 (9,51 m). Estas áreas requieren intervenciones

urgentes para garantizar la seguridad de los usuarios. El agua acumulada puede arrastrar material y obstaculizar el tráfico, además de saturar y debilitar la plataforma.

Otra amenaza importante son las temperaturas extremas. Las altas temperaturas, combinadas con períodos de menor pluviosidad, pueden agrietar y deteriorar prematuramente el pavimento, cuya resistencia a la compresión varía a lo largo de la vía. Tramos como los kilómetros 1, 3, 5, 22, 23, 26 y 32.5 muestran una baja resistencia al ser catalogados como "poco resistentes", probablemente debido a la calidad de los materiales utilizados.

En contraste, otros tramos como los kilómetros 7, 8, 13, 14, 18, 28, 30.5 y 31 presentan una resistencia media a alta al ser "moderadamente resistente" y "resistente", posiblemente por el uso de mejores materiales. El deterioro del pavimento se debe a su contracción y dilatación térmica. Asimismo, los ciclos de heladas y deshielo debilitan la estructura de la carretera, especialmente en los tramos con pendientes más pronunciadas, que abarcan el 50 % de la vía.

El incremento previsto en la intensidad y frecuencia de lluvias extremas, así como los picos más frecuentes de temperaturas máximas y mínimas como consecuencia del cambio climático, representan serias amenazas a la integridad, transitabilidad y seguridad de esta importante vía de conexión entre Loja y Catamayo.

### **6.2.3 Estado actual del tramo Loja Catamayo**

La carretera Troncal de la Sierra, específicamente en el tramo Loja-Catamayo, se extiende a lo largo de 32,4 kilómetros, según los registros existentes. Esta arteria vial dispone de dos carriles de 3,65 m para la circulación vehicular. La mayoría de la superficie de rodadura se compone de carpeta asfáltica. Sin embargo, se han identificado tramos que varían entre 300 y 800 metros con incidencia notable de baches, fisuras y deformaciones en el pavimento, lo que representa un desafío para la transitabilidad. Un ejemplo claro es un segmento de 450 metros reportado con múltiples baches y deformaciones significativas.

En lo que respecta a la señalización vial, 17,6 kilómetros de la carretera presentan una demarcación horizontal de líneas y símbolos en un estado considerado regular, mientras que 15,1 kilómetros se encuentran en buenas condiciones. Asimismo, se reporta que 12,7 kilómetros de señales verticales están en buen estado. Analizando la situación general, se observa que 20,5 kilómetros de la carretera están en un estado calificado como "regular", y 12.3 kilómetros se consideran en buenas condiciones. Los 3 kilómetros restantes se encuentran en mal estado o muestran una interrupción total de la vía.

Las cunetas, con una extensión de 25,4 kilómetros, están en buen estado. Los taludes, que suman 29 kilómetros y varían en altura entre 3 y 20 metros, están contruidos principalmente de tierra y su estado varía de regular a bueno.

El análisis detallado de las condiciones actuales de la vía E-35 entre Loja y Catamayo revela la existencia de varios puntos críticos susceptibles a los efectos del cambio climático. Basado en los datos sobre el estado del pavimento, la señalización, las cunetas, los taludes y las bermas, se identifican tres zonas críticas:

- La zona cercana a Loja muestra una alta sensibilidad, con segmentos que exhiben problemas como deformaciones, textura de "piel de cocodrilo", baches ocasionales y un estado regular de la señalización. Estos problemas podrían atribuirse a la topografía irregular y a la mayor altitud de este sector, lo que lo expone a eventos climáticos extremos.
- En el tramo intermedio entre Loja y Catamayo, la sensibilidad es media o alta. Aquí se encuentran segmentos con un deterioro considerable de la carpeta asfáltica, evidenciado en la abundancia de baches, grietas y deformaciones, que podrían dar como resultado interrupciones del tráfico.
- Los tramos cercanos a Catamayo presentan una sensibilidad media, con problemas recurrentes en cunetas, bermas y taludes. El mal estado de estas estructuras aumenta el riesgo de daños ante eventos de exceso hídrico.

La carretera E-35 Loja-Catamayo enfrenta retos significativos para adaptarse a las condiciones cambiantes del clima. Las zonas identificadas como críticas deberán ser una prioridad en futuras intervenciones de infraestructura vial, teniendo en cuenta su sensibilidad ante amenazas como derrumbes, inundaciones, deslizamientos o temperaturas extremas. Una gestión adecuada del riesgo climático en este corredor vial es crucial para prevenir interrupciones prolongadas del tráfico y garantizar la conectividad regional.

#### **6.2.3.1 Vulnerabilidad actual y futura, periodo 1981 - 2075, de la Red Vial Estatal RVE E - 35, tramo Loja – Catamayo, en un contexto de cambio climático.**

Los datos obtenidos de los escenarios SSP370 y SSP585 para los períodos 2015-2045 y 2046-2075 revelan diferencias críticas en la vulnerabilidad a lo largo de la Vía Loja-Catamayo. Se identifican segmentos específicos, como los primeros 7 km de Loja a Catamayo y los 5 km de Catamayo a Loja, que muestran una tendencia al deterioro acelerado y un aumento de eventos extremos que comprometen la infraestructura. Estos resultados (Figura 53 y Tabla 31) subrayan la necesidad de considerar la variabilidad entre escenarios y períodos en la adaptación al cambio climático de esta vía.



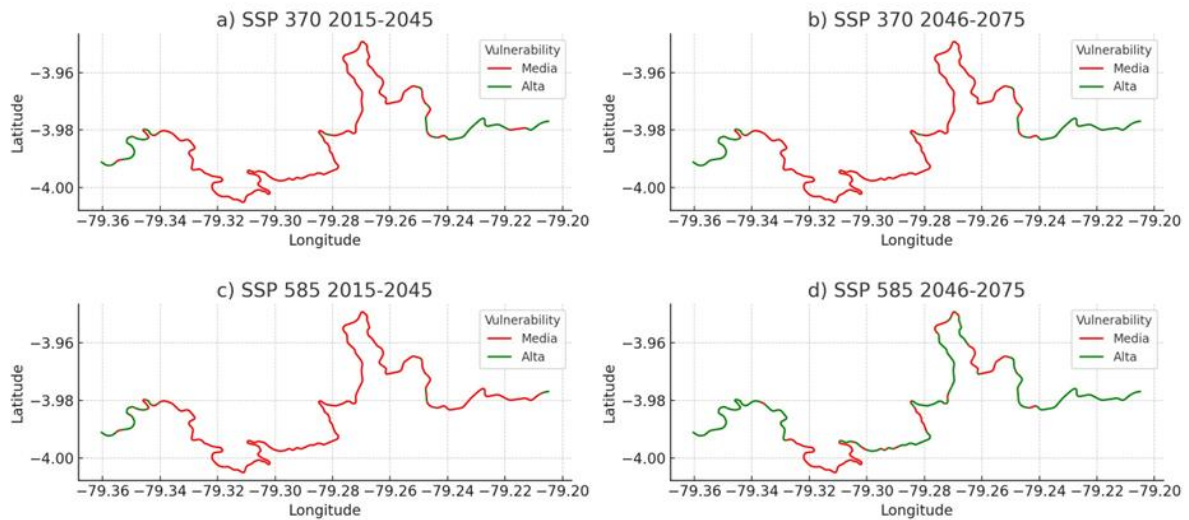


Figura 53. Proyecciones de Vulnerabilidad en el corredor de la vía Loja - Catamayo: Comparación entre SSP 370 y SSP 585 para los años 2015, 2045 y 2075.

La Tabla 31 muestra la longitud de los segmentos de la vía Loja-Catamayo y sus respectivas categorías de vulnerabilidad. Estos datos se representan gráficamente en la Figura 53, la cual permite una mejor interpretación visual de la distribución de los niveles de vulnerabilidad a lo largo del trayecto analizado.

Tabla 31. Resumen de la longitud de los segmentos de la vía Loja-Catamayo y sus respectivas categorías de vulnerabilidad.

Escenario	Vulnerabilidad	Segmentos	Longitudes
SSP 370 2015 2045	Alta	19	7664,585
	Media	18	24801,415
SSP 370 2046 2075	Alta	14	8548,669
	Media	13	23917,331
SSP 585 2015 2045	Media	16	29103,083
	Alta	16	3362,917
SSP 585 2046 2075	Alta	27	20931,406
	Media	26	11534,594

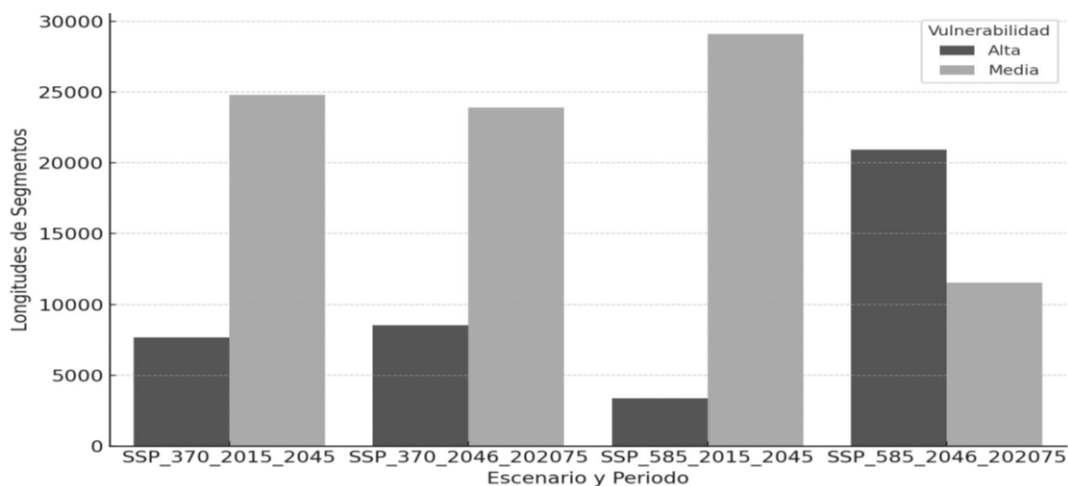


Figura 54. Longitudes de los segmentos por escenario y vulnerabilidad.

### 6.2.3.2 Evaluación comparativa de los escenarios SSP 370 y SSP 585 durante los periodos 2015-2045 y 2046-2075.

El escenario SSP370 para 2015-2045 y 2046-2075 muestra un incremento en la vulnerabilidad del segmento final, de 809,07 km a 4179,70 km, lo que resalta la necesidad de enfocarse en la estabilización de taludes y la mejora de drenajes. El segmento inicial ve un aumento de vulnerabilidad de 296,33 km a 2 505,83 km, mientras que el segmento intermedio muestra una vulnerabilidad media persistentemente alta.

En el escenario SSP585 para 2015-2045 y 2046-2075, el segmento final experimenta un riesgo elevado de daños severos por eventos climáticos extremos, evidenciado por un aumento de la vulnerabilidad alta de 206,52 km a 4 229,82 km. El segmento inicial contrasta por la ausencia de vulnerabilidad alta en el primer período, pero un aumento drástico en el segundo. El segmento intermedio presenta el mayor aumento en la vulnerabilidad alta, lo que indica la necesidad de una revisión integral de las obras de drenaje y estructuras de soporte.

### 3.2.3.3 Vulnerabilidad y adaptabilidad de la vía Loja-Catamayo ante el cambio climático

La carretera Loja-Catamayo presenta una alta vulnerabilidad inherente a su ubicación geográfica, diseño y la falta de medidas de adaptación frente a los desafíos proyectados por el cambio climático. Una evaluación exhaustiva de cuatro escenarios climáticos futuros reveló que:

- No se identificaron segmentos con baja vulnerabilidad en ninguno de los escenarios analizados.

- Bajo el escenario SSP370, hubo un predominio de vulnerabilidad media para los períodos 2015-2045 y 2046-2075.
- Para el escenario SSP585, más severo en términos de emisiones, se observó una transición de vulnerabilidad media a alta para el período 2046-2075.

Este análisis destaca la importancia de integrar la variabilidad entre escenarios y períodos dentro de las estrategias de adaptación climática para la vía Loja-Catamayo. Se pone especial énfasis en las proyecciones del escenario SSP585, que sugieren un incremento en la vulnerabilidad futura.

Se ha constatado que, bajo los escenarios más severos del cambio climático, los segmentos de mayor longitud de la vía presentan niveles más altos de vulnerabilidad. Esto resalta la urgencia de una planificación estratégica que tome en cuenta estas variables para mejorar la resiliencia y sostenibilidad de la carretera.

Los resultados obtenidos son fundamentales para la toma de decisiones estratégicas en cuanto a la gestión y planificación de la infraestructura vial. Es imperativo adaptar y fortalecer la Vía Loja-Catamayo en respuesta a las proyecciones de cambio climático.

### **6.3 Propuesta de adaptación al cambio climático para la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja - Catamayo, a través de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador.**

En primer lugar, se presenta un análisis de la encuesta realizada a técnicos especializados, enfocándose en su percepción actual y futura de la vulnerabilidad de la vía, así como en las medidas prioritarias para hacer frente a las amenazas climáticas. En segundo lugar, se detallan los hallazgos derivados del análisis de componentes principales aplicado a estas respuestas, revelando patrones subyacentes en las perspectivas de los expertos consultados.

Finalmente, con base en estos resultados, se desarrollan los fundamentos, objetivos, ejes estratégicos y otros elementos centrales de la propuesta integral. El propósito de esta propuesta es mitigar y adaptarse a los impactos del cambio climático en esta relevante conexión vial interregional.

#### ***6.3.1. Encuesta semiestructurada a los funcionarios de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador***

La encuesta semiestructurada realizada a los técnicos de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas buscó conocer su percepción sobre la vulnerabilidad climática del tramo Loja-Catamayo y las medidas neCésarias para adaptar esta vía. Los resultados revelan una preocupación generalizada por la alta exposición a amenazas climáticas y la falta de preparación actual para enfrentarlas.

La encuesta realizada a técnicos del MTOP en 2023 evidenció una preocupación generalizada por la alta vulnerabilidad de la vía Loja-Catamayo ante amenazas climáticas (Ver Tabla 32 y Figura 55).

Tabla 32. Percepciones de los Técnicos del MTOP sobre la Vulnerabilidad y la Necesidad de Adaptación de la Vía Loja-Catamayo ante el Cambio Climático.

Pregunta	Sí (%)	No (%)
Preocupación de los técnicos del MTOP de la Zonal 7 y Loja ante las amenazas climáticas en la vía Loja – Catamayo.	88,9	11,1
Disposición de fondos para la adaptación al cambio climático de la vía Loja – Catamayo.	88,9	11,1
Respuestas ante la necesidad de contar con inversión pública para la adaptación.	100	0

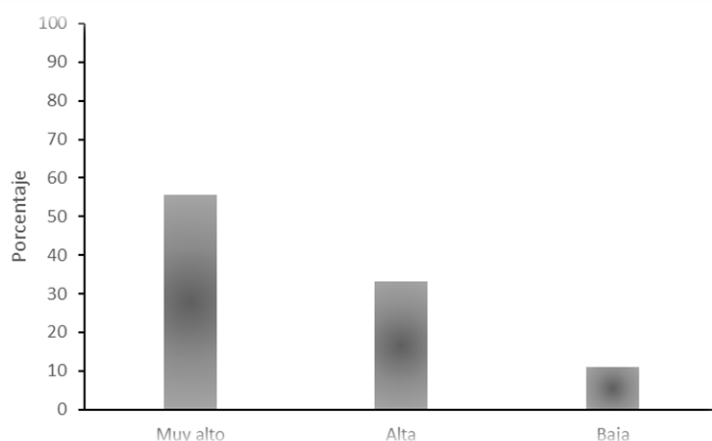


Figura 55. Nivel de percepción de los encuestados.

Entre las medidas prioritarias, se mencionaron el mejoramiento del drenaje (75 %), el reforzamiento estructural (87 %) y los sistemas de alerta temprana (Figuras 55). Se valoró positivamente la cooperación internacional (100 %), aunque se percibieron desafíos presupuestarios (75 %), técnicos (87,5 %) y de escasez de recursos humanos (50 %) (Figura 56).

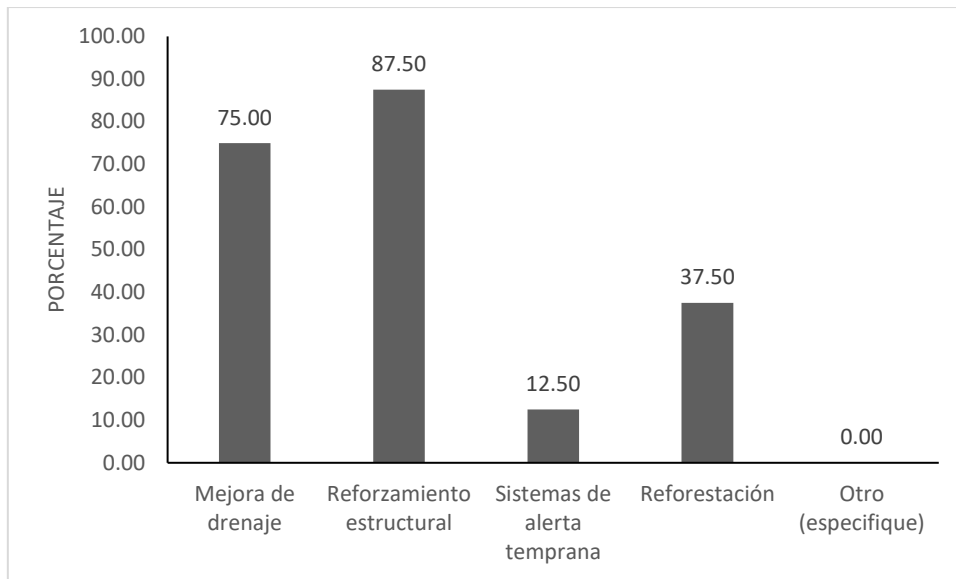


Figura 56. Medidas prioritarias para el cambio climático consideradas en la encuesta semiestructurada.

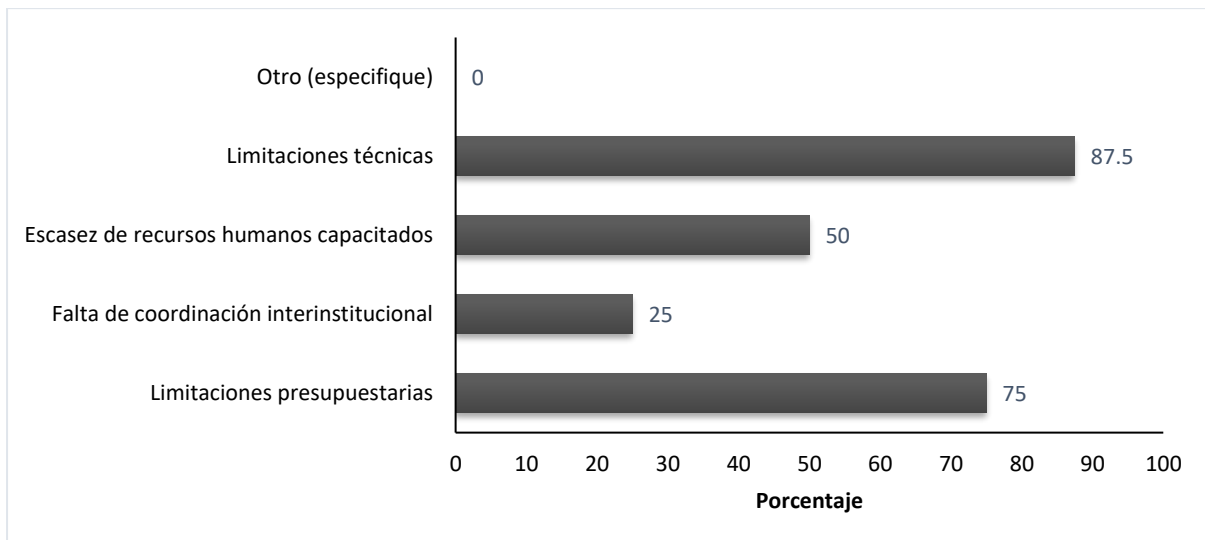


Figura 57. Respuestas a la cooperación internacional de los encuestados del MTOP.

De acuerdo con la pregunta, las principales amenazas climáticas identificadas para el tramo Loja-Catamayo de la RVE E-35 son: incremento de precipitaciones extremas (62,50 % de los encuestados), incremento de deslizamientos (75 %), daños en infraestructura (87,50 %) e interrupciones de tráfico (62,50 %) (Ver Figura 57).

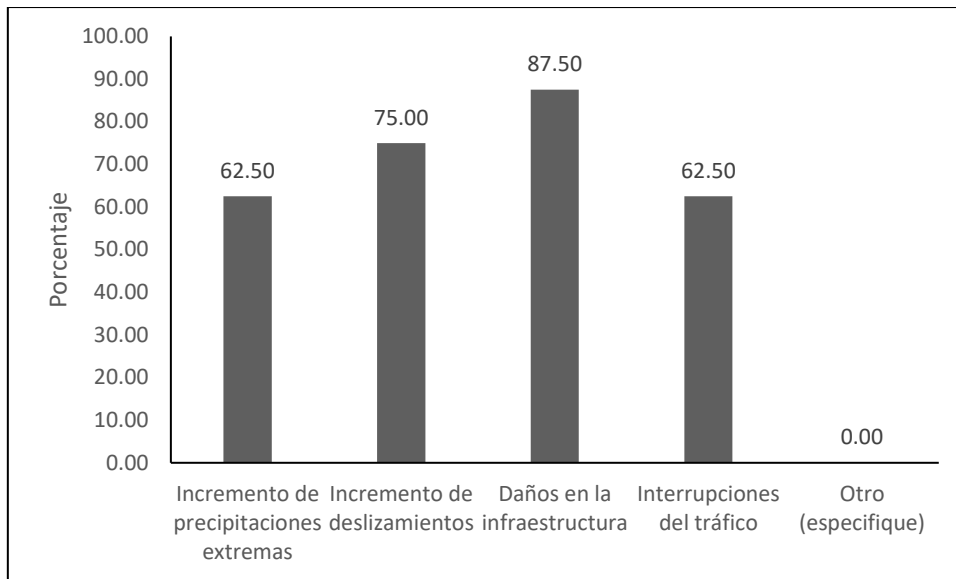


Figura 58. Principales amenazas climáticas identificadas para el tramo Loja-Catamayo de la RVE E-35.

En cuanto a la preparación actual de la vía para enfrentar el cambio climático, la mayoría de los técnicos (55,6 %) opinó que no está preparada para hacer frente a este fenómeno, mientras que una minoría (44,4 %) consideró que su nivel de preparación es moderado (Ver Figura 582).

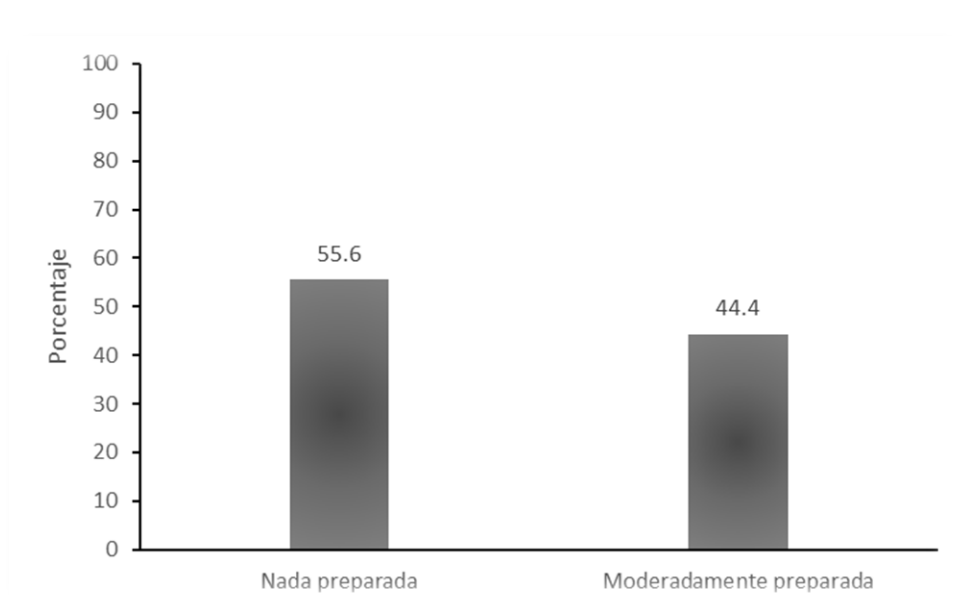


Figura 59. Opinión de la preparación de la vía ante el Cambio Climático.

Sobre el reforzamiento de la infraestructura vial como medida de adaptación al cambio climático, el 66,7 % de los técnicos lo consideraron muy neCésario y el 33,3 % lo vieron como neCésario (Ver Figura 59).

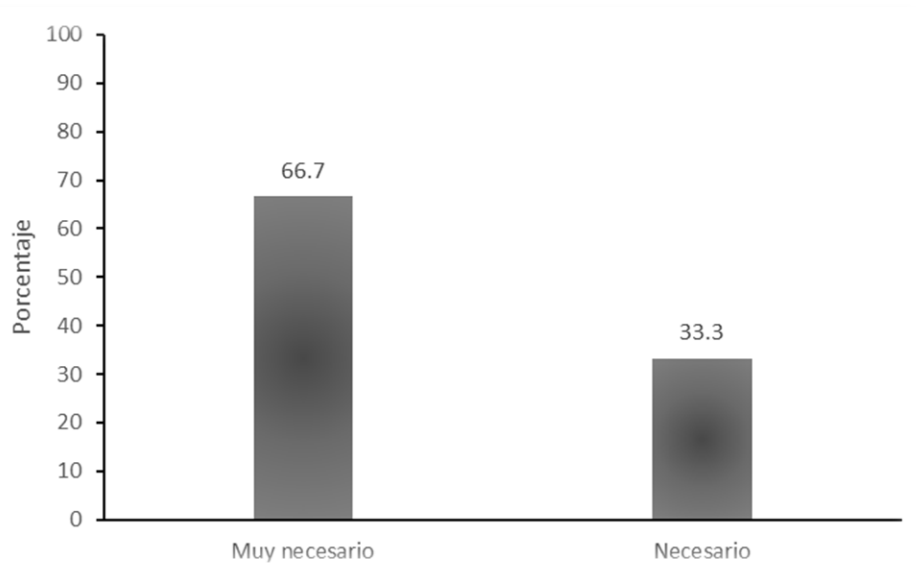


Figura 60. Opinión sobre el reforzamiento de la infraestructura vial como medida de adaptación al cambio climático.

Respecto a la relevancia de incluir a las comunidades locales en la toma de decisiones, la mitad de los encuestados (44,5 %) le dio alta relevancia a este aspecto. Otras respuestas fueron: relevancia media (33,3 %), muy baja (11,1 %) y muy alta (11,1 %) (Ver Figura 60).

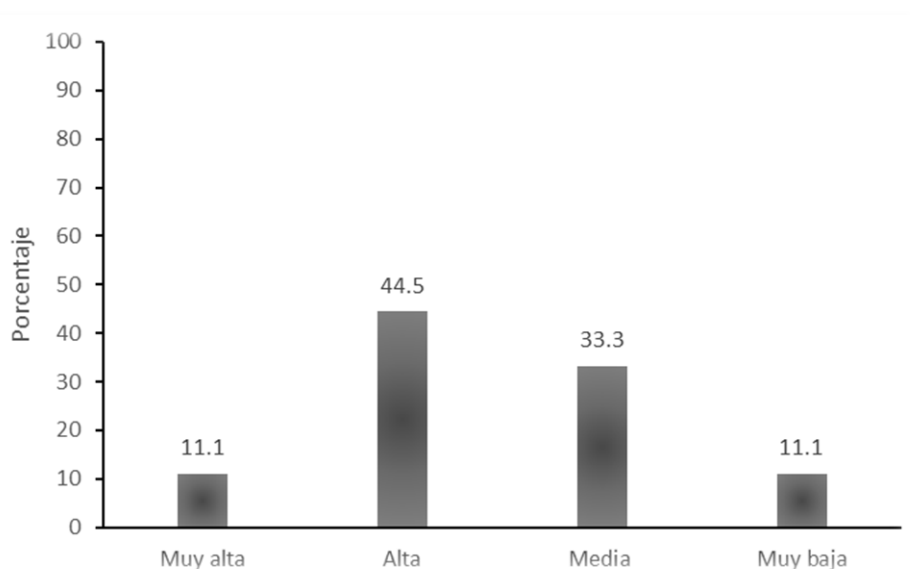


Figura 61. Relevancia de incluir a las comunidades en la toma de decisiones.

Sobre la efectividad de campañas de educación y concientización para la adaptación en la vía Loja-Catamayo, hubo opiniones divididas: 37,5 % las consideró efectivas, 25 % poco efectivas, 25 % muy efectivas y 12,5 % nada efectivas (Ver Figura 61).

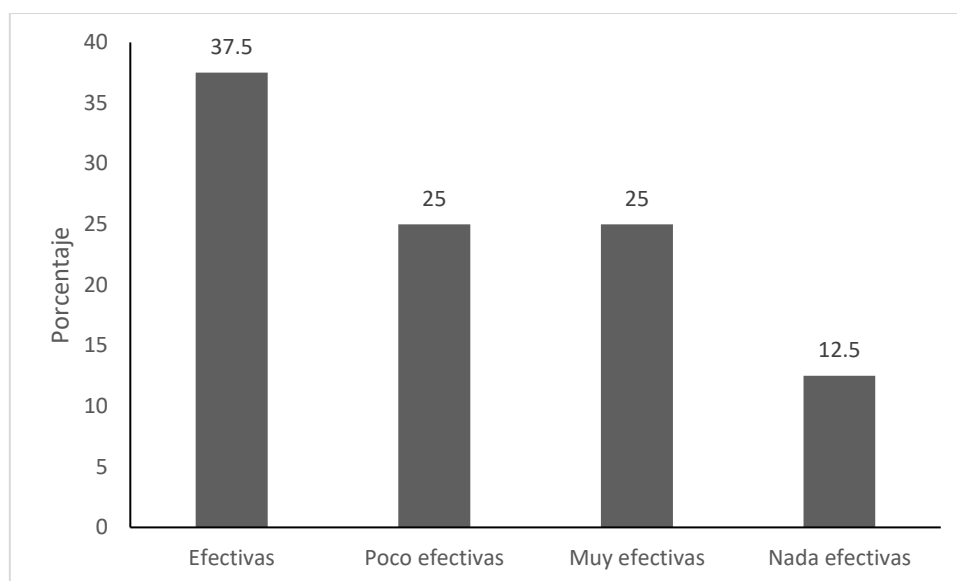


Figura 62. Efectividad de las campañas de educación.

La gran mayoría de los encuestados (87,5 %) vio como beneficioso promover la reforestación en zonas de riesgo cercanas a la vía, una minoría (12,5 %) no lo consideró así.

El análisis de componentes principales de las respuestas permitió discernir patrones subyacentes en las visiones de los técnicos. Se identificaron perspectivas contrapuestas: una centrada en los riesgos inmediatos y respuestas infraestructurales, y otra con un enfoque más amplio sobre resiliencia sistémica.

Considerando estos hallazgos, se desarrolló una propuesta integral para abordar la adaptación y mitigación del cambio climático en la vía Loja-Catamayo. Esta propuesta tiene cuatro ejes estratégicos: infraestructura resiliente, mitigación de emisiones, fortalecimiento de capacidades y gobernanza participativa. Se busca implementar medidas técnicas, pero también un nuevo modelo de gestión climática basado en alianzas multi-actor para reducir la vulnerabilidad de esta importante conexión vial interregional. Cada uno de los resultados de estos aspectos se detallan a continuación:

### ***6.3.2 Análisis de componentes principales (ACP) de las respuestas de la encuesta sobre la vulnerabilidad de la carretera Loja-Catamayo al cambio climático***

Este análisis reveló cuatro dimensiones principales que, juntas, explican aproximadamente el 95 % de la variación en las perspectivas de los actores clave ante los desafíos de adaptación (ver Figura 63).



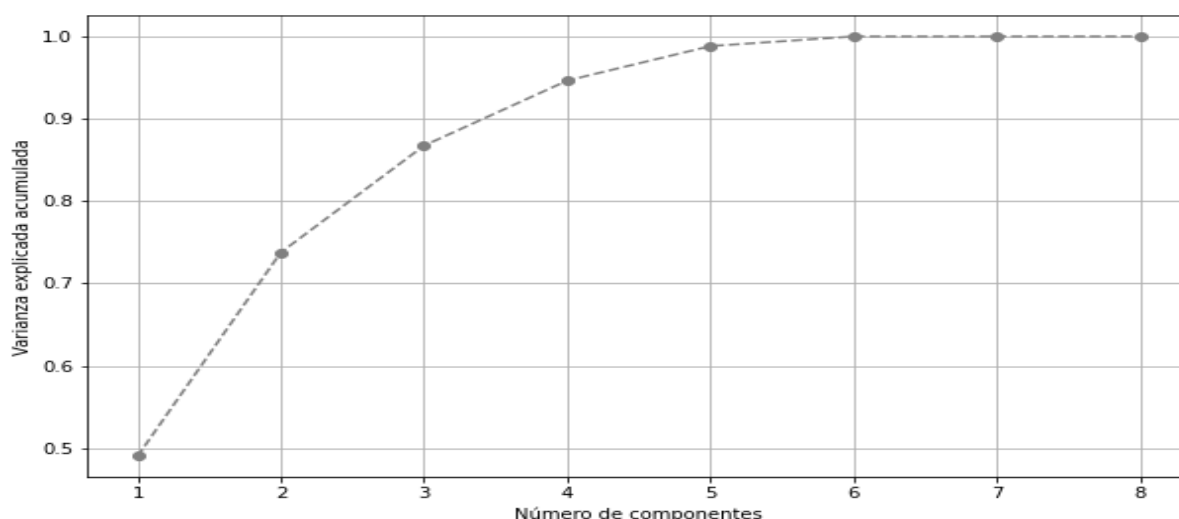


Figura 63. Los primeros cuatro componentes explican más del 95% de la varianza total en los datos.

El primer componente, al que he denominado Conciencia de Amenazas Climáticas, representa el 48,99 % de la variabilidad en el PCA. Esta muestra una fuerte conciencia entre los encuestados sobre cómo el cambio climático afecta actualmente la estabilidad de la infraestructura vial regional. Se evidencia por la respuesta afirmativa a la primera pregunta de la familiaridad de la situación actual con de la carretera a la vulnerabilidad climática (Preg1 "Sí", carga=-0,10), una alta percepción de vulnerabilidad actual (Preg3 "Muy Alta", carga=-0,29), aunque hay escepticismo en algunos (Preg1 "No", carga=0,10). La susceptibilidad a eventos extremos, como fuertes precipitaciones (Preg2 "Precipitaciones Extremas", carga=-0,29) e interrupciones (Preg2 "Interrupciones", carga=-0,12), también se destaca como un factor crítico. Este componente subraya la importancia de casi la mitad de las variaciones en las percepciones sobre la adaptación.

El segundo componente, llamado Mitigación de Amenazas Específicas, abarca el 24,75 % de la variabilidad. Aquí, los encuestados identifican el aumento de deslizamientos de tierra (Preg2 "Deslizamientos", carga=0,34) como un impacto significativo, priorizando soluciones técnicas como la mejora del drenaje (Preg5 "Refuerzo Estructural", carga=-0,11) y la estabilización de taludes. No obstante, la percepción de una escasez de recursos humanos (Preg8 "Escasez RH", carga=0,32) y limitaciones técnicas (Preg8 "Limitaciones Técnicas", carga=0,31) indica opiniones divididas sobre la factibilidad de estas medidas.

El tercer componente, denominado Limitaciones Sistémicas, comprende el 12,97 % de la variabilidad. Revela que los participantes ven barreras significativas como limitaciones presupuestarias (Preg8 "Limitación Presupuestaria", carga=-0,11), necesidades regulatorias (Preg6 "Muy NeCésario", carga=-0,21), y la falta de coordinación institucional (Preg8 "Falta de Coordinación", carga=0,21) como obstáculos clave para una respuesta efectiva al cambio



### ***6.3.3 Propuesta de la Subsecretaría Zonal 7 para la adaptación y mitigación de la vulnerabilidad climática en la vía Loja-Catamayo***

#### **6.3.3.1 Fundamentación**

Considerando los resultados de la encuesta realizada a técnicos especializados y el estado actual de la vía, se evidencia una alta vulnerabilidad actual y baja preparación de la vía Loja-Catamayo para enfrentar los efectos del cambio climático. Por ello, es prioritario desarrollar una propuesta integral de adaptación y mitigación que incremente la resiliencia de esta importante vía de conectividad interregional.

#### **6.3.3.2 Objetivos**

- Reducir la vulnerabilidad de la vía Loja-Catamayo mediante infraestructura adaptada para eventos climáticos extremos.
- Minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero producto de operaciones en la vía.
- Fortalecer capacidades institucionales para la adaptación y mitigación del cambio climático.
- Promover la participación coordinada de diferentes actores para la resiliencia climática de la vía.

#### **6.3.3.3 Ejes estratégicos:**

##### **6.3.3.3.1 Infraestructura resiliente**

- Reforzamiento estructural en áreas críticas
- Mejora de sistemas de drenaje
- Implementación de sistemas de alerta temprana

##### **6.3.3.3.2 Mitigación de emisiones**

- Forestación con especies nativas en zonas de amortiguamiento
- Optimización de procesos constructivos para reducir huella de carbono

##### **6.3.3.3.3 Fortalecimiento de capacidades**

- Formación de talento humano en ingeniería y gestión climática
- Investigación aplicada sobre vulnerabilidad de la vía

#### **6.3.3.3.4 Gobernanza participativa**

- Mesas de diálogo multi-actor para coordinar iniciativas
- Alianzas público-privadas para financiamiento y ejecución de medidas.

La propuesta para mejorar la resiliencia y adaptabilidad de la vía Loja-Catamayo frente a los desafíos del cambio climático es una respuesta integral a los problemas identificados en el presente estudio, revelando patrones significativos de variabilidad climática en la vía Loja - Catamayo, proyectando escenarios futuros bajo los modelos SSP 370 y SSP 585 para los periodos 2015-2045 y 2046-2075. Con base en estos resultados, la propuesta busca abordar de manera efectiva las interrupciones en la transitabilidad y los riesgos asociados con el cambio climático, garantizando así una infraestructura vial sostenible y segura.

El objetivo principal de la propuesta es reducir los impactos del cambio climático en la transitabilidad de la vía Loja-Catamayo. Para lograr esto, se han establecido indicadores clave, como el índice de interrupción del tráfico y el tiempo promedio de cierre de la vía debido a eventos climáticos. Estos indicadores se verificarán a través de registros de tráfico y reportes de emergencias. El proyecto se desarrollará bajo supuestos críticos, incluyendo la disponibilidad de financiamiento, la voluntad política para implementar cambios normativos y la participación de los actores involucrados, con un presupuesto estimado de 2 500 000 dólares.

Además, se plantea como propósito central la implementación de medidas integrales de adaptación y mitigación en la vía. Esto implica no solo la construcción de infraestructura resiliente, sino también la integración de prácticas de compensación ambiental, desarrollo de capacidades y gobernanza colaborativa. Se medirá el progreso a través del número de medidas de adaptación y mitigación implementadas que resultaron del estado actual del proyecto y la inversión ejecutada, supervisada mediante informes de ejecución y presupuesto devengado. La efectividad de estas medidas dependerá de la existencia de un marco normativo habilitante y la continuidad de la voluntad política.

En resumen, la propuesta se basa en un análisis detallado de las condiciones climáticas actuales y futuras, y se estructura alrededor de objetivos claros y medibles para mejorar la adaptabilidad y resiliencia de la vía Loja-Catamayo. Este enfoque integral garantiza no solo una respuesta efectiva a los desafíos inmediatos, sino también una planificación sostenible y a largo plazo frente a los impactos del cambio climático, la misma que se muestra en la Tabla 33 en un marco lógico.

Tabla 33. Marco lógico para la propuesta de adaptación y mitigación de la vulnerabilidad climática en la vía Loja-Catamayo por la Subsecretaría Zonal 7.

Nivel	Objetivo	Indicadores	Medios de verificación	Supuestos	Costos
<b>Fin</b>	Reducir los impactos del cambio climático en la transitabilidad de la vía Loja-Catamayo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Índice de interrupción del tráfico en la RVE E - 35 tramo Loja-Catamayo. Número de eventos que implican cierres totales o parciales de la vía por año, de una línea base de 8 eventos en 2022 a máximo 2 eventos al 2026.</li> <li>- Tiempo promedio de cierre de la vía por eventos climáticos. Promedio de horas anuales de cierres totales de la RVE E - 35 tramo Loja-Catamayo por eventos hidroclimáticos extremos, de una línea base de 180 horas en 2022 a menos de 20 horas al 2026.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Registros de tráfico</li> <li>- Reportes de emergencias</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Financiamiento disponible</li> <li>- Voluntad política y normativa habilitante</li> <li>- Participación comprometida de actores</li> </ul>	Reducir los impactos del cambio climático en la transitabilidad de la vía Loja-Catamayo \$2 500 000

Nivel	Objetivo	Indicadores	Medios de verificación	Supuestos	Costos
Propósito	Implementar medidas integrales de adaptación y mitigación en la vía Loja-Catamayo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Número de medidas de adaptación y mitigación implementadas. Cantidad de iniciativas de adaptación al cambio climático y mitigación de GEI incorporadas en la RVE E - 35 tramo Loja-Catamayo, de 0 (línea base 2022) a al menos 8 medidas implementadas al 2026.</li> <li>- Inversión ejecutada en adaptación y mitigación. Monto de dólares invertidos en acciones de adaptación climática y mitigación de emisiones en la RVE E - 35 tramo Loja-Catamayo, de USD 0 (línea base en 2022) a al menos USD 500.000 al 2026.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Informes de ejecución de medidas</li> <li>- Presupuesto devengado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Voluntad política</li> <li>- Marco normativo habilitante</li> </ul>	
Componentes	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Infraestructura vial resiliente</li> <li>2. Compensación ambiental</li> <li>3. Desarrollo de capacidades</li> </ol>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kilómetros de vía intervenidos para mejorar resiliencia: Longitud de</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Informes de obra</li> <li>2. Catastros de reforestación</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Financiamiento</li> <li>2. Disponibilidad de terrenos</li> <li>3. Convocatoria efectiva</li> </ol>	1. Infraestructura vial resiliente \$1 600 000

Nivel	Objetivo	Indicadores	Medios de verificación	Supuestos	Costos
	4. Gobernanza colaborativa	<p>tramos de la RVE E - 35 entre Loja-Catamayo sujetos a mejoras de infraestructura por año, de 0 km (línea base en 2022) a 30 km intervenidos al 2026.</p> <p>- Hectáreas reforestadas en zonas de amortiguamiento: Superficie con cobertura arbórea recuperada en las zonas adyacentes a la RVE E - 35 tramo Loja-Catamayo, de 0 Ha (línea base en 2022) a 80 Ha reforestadas al 2026.</p> <p>- Número de funcionarios capacitados en gestión climática: Cantidad de gestores viales del MTOP capacitados en adaptación al cambio climático y sostenibilidad de infraestructura, de 0 (línea base en 2022) a 10</p>	<p>3. Listados de participantes</p> <p>4. Actas de reuniones</p>	4. Participación	<p>2. Compensación ambiental \$400 000</p> <p>3. Desarrollo de capacidades \$2 00 000</p> <p>4. Gobernanza colaborativa \$300 000</p>

Nivel	Objetivo	Indicadores	Medios de verificación	Supuestos	Costos
		<p>funcionarios capacitados al 2026.</p> <p>- Mesas de diálogo y alianzas conformadas: Número de espacios y acuerdos multi-actor generados para abordar la adaptación al cambio climático de la RVE E - 35 tramo Loja-Catamayo, de 0 (línea base en 2022) a al menos 3 mesas/alianzas conformadas al 2026.</p>			
<b>Actividades</b>	<p>1.1 Elaboración de estudios de vulnerabilidad</p> <p>1.2 Obras de reforzamiento y drenaje</p> <p>2.1 Reforestación y manejo de cuencas</p> <p>3.1 Capacitación de funcionarios</p> <p>3.2 Investigación sobre vulnerabilidad de infraestructura vial.</p> <p>4.1 Mesas de diálogo multi-actor</p>	<p>- Términos de referencia</p> <p>- Contratos</p> <p>- Planes de manejo</p> <p>- Programas de capacitación</p> <p>- Memorias de reuniones</p> <p>- Convenios</p>	<p>- Presupuesto</p> <p>- Equipos técnicos</p> <p>- Material vegetal</p> <p>- Instructores</p> <p>- Convocatoria</p> <p>- Coordinación</p>		<p>1.1. Efectuar 1 estudios de vulnerabilidad de la RVE E - 35 tramo Loja-Catamayo frente al cambio climático al 2026 (USD 100 000 c/u).</p> <p>1.2. Ejecutar mantenimiento preventivo anual</p>



Nivel	Objetivo	Indicadores	Medios de verificación	Supuestos	Costos
	4.2 Conformación de alianzas público-privadas				<p>(USD 250 000) e implementar medidas de reforzamiento y mejora de drenaje (USD 10 km por USD 500 000) en 30 km de la RVE al 2026.</p> <p>2.1. Reforestar 80 Ha en zonas de amortiguamiento de la RVE E - 35 Loja-Catamayo (USD 500 000) al 2026.</p> <p>3.1. Capacitar a 20 funcionarios del MTOP en gestión vial ante el cambio climático (USD 100 000 total) al 2026.</p> <p>3.2. Realizar un estudio para generar modelos de vulnerabilidad futura de la RVE E - 35</p>

Nivel	Objetivo	Indicadores	Medios de verificación	Supuestos	Costos
					tramo Loja-Catamayo al 2026 (USD 100 000). 4.1. Conformar 2 mesas de diálogo público-privadas para la gestión climática de la RVE E - 35 (USD 50 000) al 2026. 4.2. Establecer una alianza público-privada para cofinanciar medidas de adaptación en la RVE E - 35 (USD 250 000 de contraparte) al 2026

Nota: Estos costos son estimados y pueden variar según los factores específicos del proyecto, como la magnitud de los daños causados por los eventos climáticos, la disponibilidad de terrenos para la reforestación, y el nivel de participación de los actores involucrados.

Es importante mencionar que los costos de las medidas de adaptación y mitigación deben ser considerados como una inversión, ya que pueden ayudar a reducir los costos de los daños causados por los eventos climáticos en el futuro.

Conjuntamente con la Subsecretaría Zonal 7 del MTOP se formuló la presente propuesta para la adaptación y mitigación de la vulnerabilidad climática en la vía Loja-Catamayo durante los próximos 4 años. El objetivo de la propuesta será reducir los impactos del cambio climático en la transitabilidad de esta importante vía. Para lograrlo, la Subsecretaría planteará implementar medidas integrales en cuatro ejes: infraestructura vial resiliente, compensación ambiental, desarrollo de capacidades y gobernanza colaborativa.

La propuesta contempla intervenciones concretas cada 4 años. Además, se plantea que, con la experiencia adquirida en cada periodo cuatrienal, se podrán mejorar las medidas en los siguientes ciclos de implementación.

Según la propuesta, en los primeros 4 años, se intervendrán varios kilómetros de la vía para mejorar su resiliencia frente a eventos climáticos extremos. Asimismo, se reforestarán hectáreas en las zonas de amortiguamiento de la vía, contribuyendo a la compensación ambiental. En paralelo, se capacitará a funcionarios públicos en temas de gestión climática e infraestructura vial resiliente. Finalmente, se conformarán mesas de diálogo y alianzas público-privadas para una gobernanza colaborativa entre diversos actores.

Los indicadores planteados permitirán medir la disminución de interrupciones en la vía por causas climáticas. Los medios de verificación serán informes técnicos, catastros de reforestación, listados de participantes capacitados y actas de reuniones de gobernanza.

Si bien la propuesta requerirá continuidad en el tiempo y un presupuesto general de 2 500 000, sentará bases importantes para avanzar hacia una mayor resiliencia de esta conexión vial estratégica. Se recomendará planificar intervenciones quinquenales, monitorear avances periódicamente, promover la coordinación técnica interinstitucional y buscar alianzas de largo plazo con el sector privado, para dar sostenibilidad a estos esfuerzos.

## 7. Discusión

### 7.1 Condiciones climáticas actuales de precipitación y temperatura sobre la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja – Catamayo

Este estudio identificó un patrón estacional típico, con más precipitaciones y temperaturas elevadas entre febrero y mayo, y un periodo más seco y fresco entre julio y agosto, que corresponde a un régimen estacional bimodal típico de Los Andes, para la precipitación y con una pequeña variación para la temperatura, lo cual constituye un patrón de referencia esencial para evaluar variaciones futuras, como enfatizan Espinet (2016) y García-Garizábal (2017) al destacar la incorporación de la variable climática en planificación del transporte.

La investigación actual identifica al modelo BCC-CSM2-MR como el más preciso para proyecciones climáticas en esta zona de estudio y en línea con lo encontrado por Morán et al. (2022) en su estudio sobre modelos del CMIP6 para Ecuador. Los escenarios considerados fueron SSP 370<sup>10</sup> como escenario intermedio en el que se asume que seguirán las tendencias actuales de desarrollo y el SSP 585<sup>11</sup> como el escenario extremo con un alto nivel continuo de emisiones que conducen a altas concentraciones de gases de efecto invernadero, resaltando la importancia de contemplar ambos tipos de escenarios, como menciona García-Garizábal et al. (2017).

Siguiendo las recomendaciones de Austria & Díaz-Jiménez (2018) y Taylor (2020), se establecieron periodos de análisis de 30 años (2015-2045 y 2046-2075) para observar las tendencias de largo plazo en temperatura y precipitaciones anuales y mensuales en la Ruta E-35. Los resultados muestran una variabilidad espacial y temporal significativa, especialmente bajo el escenario SSP585 de altas emisiones, lo que indica la necesidad de medidas adaptativas en la infraestructura vial, como subraya Taylor (2020).

Según registros históricos, de 1981 al 2010 llovían, 1052,96 mm al año en el trayecto de Loja-Catamayo, sirve de línea base ante escenarios de cambio climático del modelo BCC-CSM2-MR. Bajo el escenario SSP370 se espera un aumento gradual en la lluvia media anual del 8,91 % para el 2046-2075 (1 146 mm); y para el escenario SSP585 pronostica un 14,79 % (1 208 mm) de

---

<sup>10</sup> El número 370 se refiere a que se proyecta que para 2100 habrá una concentración aproximada de 370 partes por millón de CO<sub>2</sub>

<sup>11</sup> El número 585 indica que para 2100 se proyecta una concentración de 585 partes por millón de CO<sub>2</sub>

aumento en la precipitación media anual. Estos aumentos se observan también en medias mensuales (entre 8,91 % y 16,67 %) y concuerdan con tendencias identificadas por Campozano et al. (2020) y Salazar et al. (2023).

Estos aumentos en las precipitaciones medias también auguran una intensificación de eventos extremos de lluvia, cuyas tasas de retorno se proyectan exponencialmente crecientes de 208,47 mm cada 2 años hasta 468,6 mm cada 100 años en el tramo Loja-Catamayo. Este marcado incremento en la recurrencia de lluvias intensas resalta la necesidad de contar con infraestructura adaptada y resiliente para afrontar los desafíos del cambio climático en las próximas décadas, como destacan los estudios de Földes et al. (2018) y Padrón et al. (2015) sobre eventos extremos que hace necesario desarrollar infraestructura adaptada y resiliente al cambio climático.

El análisis histórico 1980-2010 para la E-35 tramo Loja-Catamayo al ser un régimen bimodal en los valores mensuales de precipitación durante el año y al compararlos con los regímenes mensuales bimodales de los escenarios SSP370 y SSP585 en 2015-2075, se pronostica un aumento generalizado de precipitaciones mensuales, entre 60-90 % en octubre-marzo; y descensos en febrero (15 %) y diciembre (5 %). Según informe sobre IV eje vial Bellavista-Zumba (2019), los valores promedio mensuales con y sin cambio climático muestran también un régimen bimodal, con aumentos de 40 % en meses secos y disminución de 30% en lluviosos para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 en un periodo de 1990 al 2013. Sus hallazgos se alinean a cambios proyectados en E-35 Loja-Catamayo, confirmando en importancia de considerar variabilidad regional en regímenes para dimensionar impactos.

Los análisis de las temperaturas medias, máximas y mínimas multianuales en el periodo histórico 1981-2010 en el área de influencia de la red vial E-35 tramo Loja-Catamayo, revelan un marcado régimen estacional, consistente con la región interandina. Las temperaturas medias y máximas presentan su pico entre marzo y noviembre (16,69-23,94 °C), mientras descienden en invierno (15,53-21,05 °C). Las mínimas fluctúan entre 11,47-10,75 °C.

Estos patrones guardan coherencia con estudios en la región sur como los de Padilla et al. (2017), aunque Breuer et al. (2013) advierten sobre tendencias locales de enfriamiento ante aumentos en las variaciones diarias. No obstante, al contrario, Oñate-Valdivieso y Bosque Sendra (2011) determinaron incrementos de 0,1-2,4 °C en el 94 % de estaciones evaluadas en la cuenca

Catamayo-Chira. Similarmente, Aguirre et al. (2015) pronostican ascensos de 1,21-1,46 °C (RCP2.6) y 2,01-2,37 °C (RCP8.5) en toda la región.

De hecho, al contrastar las temperaturas históricas 1981-2010 del tramo Loja-Catamayo con el periodo 2046-2075 bajo el escenario SSP585, se esperan aumentos medios de 1,61 °C en la media multianual, 2,28 °C en la máxima, y 2,71 °C en la mínima; corroborando un agravamiento del calentamiento en Los Andes según advierten Pourrut et al. (2018).

## **7.2 Vulnerabilidad actual y futura, periodo 1981-2075, de la Red Vial Estatal RVE E - 35, tramo Loja – Catamayo, en un contexto de cambio climático para una comprensión adecuada en la gestión y desarrollo infraestructura vial sostenible**

La evaluación de la vulnerabilidad de la Red Vial Estatal E - 35, específicamente el tramo Loja-Catamayo, frente a los desafíos planteados por el cambio climático, destaca la necesidad de una gestión y desarrollo infraestructural sostenible que se ajuste a las realidades emergentes. Esta evaluación se enmarca en un contexto donde los eventos climáticos extremos, como las precipitaciones intensas y las fluctuaciones de temperatura, se están volviendo cada vez más frecuentes y severos, tal como lo indican estudios globales como los de Koks et al. (2019), Zlateva y Hadjitodorov (2022), y Moretti y Loprencipe (2018). Estos estudios resaltan el impacto sustancial de tales eventos en la infraestructura vial, enfatizando la urgencia de adoptar medidas de adaptación climática.

La identificación actual de extensas longitudes entre 300 y 800 metros con severo deterioro del pavimento, así como 33 alcantarillas en condición deficiente en esta vía, pone de relieve la urgencia de estrategias integrales de rehabilitación, lo que hace necesario la aplicación de modelos para predecir el desempeño futuro de pavimentos permitiría optimizar las acciones de mantenimiento según advierten Prozzi & Madanat (2004). Asimismo, estudios como los de Stempihar et al. (2012) demuestran el impacto de temperaturas extremas en el desempeño de capas asfálticas porosas, por lo que considerar proyecciones climáticas locales al diseñar las renovaciones es imperativo (Qiao et al, 2013).

De forma complementaria, tecnologías de escaneo e inspección con procesamiento digital de imágenes, como las propuestas por Durán et al. (2022), viabilizan la evaluación remota de

sistemas subterráneos de drenaje para identificar y priorizar tramos colapsados, como destacan Phyu & Khaodhiar (2021). Por lo tanto, abordar la recuperación integral de este corredor vial requerirá no solamente del remplazo del pavimento por alternativas más resilientes, sino también de la habilitación de un sistema de drenaje y captación de aguas lluvias eficiente mediante el aprovechamiento de innovaciones en la evaluación de su desempeño actual. La conjugación de estas soluciones permitirá recuperar la transitabilidad plena en el mediano plazo.

La identificación de sectores críticos en la longitud de la vía Loja – Catamayo, que se desarrolla en una topografía accidentada, concuerda con estudios que advierten sobre la creciente amenaza de deslizamientos e inundaciones en zonas de alta pendiente. Goswami et al. (2006) y Dettinger (2011) pronostican un aumento en la intensidad de lluvias extremas y tormentas, las que desestabilizan laderas y saturan cauces en terrenos irregulares. De igual forma, la alta incertidumbre sobre sequías futuras destacada por Ukkola et al. (2020) tiene implicaciones en la recarga de acuíferos y por ende en el escurrimiento superficial.

Considerando lo anterior, estrategias integrales de adaptación en esta vía deben contemplar reforzamiento de taludes con cobertura vegetal, canalización de quebradas mediante alcantarillas adecuadamente dimensionadas y monitoreo cercano de condiciones meteorológicas de alto riesgo. Asimismo, la perspectiva ecosistémica de Goswami et al. (2006) resalta la necesidad de evaluar impactos en la biodiversidad ante la alteración de hábitats por estos fenómenos en zonas de alta pendiente. La evidencia climatológica respalda plenamente la priorización de tramos críticos en áreas propensas como Loja y Catamayo para adaptar la infraestructura vial mediante soluciones integrales de ingeniería ante eventos meteorológicos cada vez más extremos. Considerando además efectos ecológicos, dará una visión más amplia para garantizar la resiliencia del corredor.

La carretera Loja-Catamayo, con sus 35,7 km de longitud y un tráfico proyectado de 5 377 vehículos por día, es una arteria logística crucial en el desarrollo económico, productivo y social en la Región 7. Sin embargo, se enfrenta a desafíos significativos debido a que actualmente existen tramos con severo deterioro del pavimento que la coloca en una vulnerabilidad media en su gran mayoría y la proyección de un aumento en la vulnerabilidad hacia fines de siglo a alta. Estos aspectos subrayan la necesidad de una planificación robusta y de estrategias de mantenimiento que aseguren su funcionalidad a largo plazo. La literatura relacionada, como la de Prozzi & Madanat

(2004) y Stempihar et al. (2012), sugiere que el impacto de las temperaturas extremas y otros factores climáticos deben ser considerados cuidadosamente en el diseño y mantenimiento de la infraestructura vial.

La evidencia de un fuerte incremento de la vulnerabilidad de media a alta en segmentos críticos de esta vía, bajo diferentes escenarios climáticos, particularmente entre SSP370 y SSP585, subraya la necesidad de una planificación adaptativa. Mientras SSP370 muestra una vulnerabilidad menor en el corto plazo (2015 al 2045) y un aumento en el largo plazo (2046 -2075), SSP585 indica una mayor vulnerabilidad en general, lo que está alineado con las proyecciones de un futuro de altas emisiones. Estos hallazgos sugieren la importancia de desarrollar estrategias de adaptación que sean flexibles y capaces de responder a variaciones temporales y a diferentes niveles de impacto climático, como sugiere Füssel (2007). Abordar la recuperación integral de este corredor vial requerirá no solamente del remplazo del pavimento por alternativas más resilientes, sino también de la habilitación de un sistema de drenaje y captación de aguas lluvias eficiente mediante el aprovechamiento de innovaciones en la evaluación de su desempeño actual. La conjugación de estas soluciones permitirá recuperar la transitabilidad plena en el mediano plazo.

La evidencia de un fuerte incremento de la vulnerabilidad en segmentos críticos de esta vía hacia fines del presente siglo, con variaciones entre escenarios, realza la necesidad de análisis integrales de riesgo climático y planificación proactiva de adaptación. En este contexto, los exhaustivos reportes del IPCC como los de Field (2014) y Parmesan et al. (2014) entregan visiones holísticas de potenciales impactos y medidas de ajuste bajo diferentes trayectorias globales de emisiones. No obstante, Olesen et al. (2007) ponen el énfasis en la importancia de considerar las inherentes incertidumbres en las proyecciones climáticas al momento de tomar decisiones. Por su parte, Torresan et al. (2008) plantean que evaluaciones regionales permiten caracterizar con mayor certeza las particularidades y requerimientos de adaptación de áreas geográficas acotadas. En contraparte, Rohmer et al. (2021) argumentan que la selección de escenarios igual juega un rol preponderante en los análisis de vulnerabilidad. Sopesando estos antecedentes, se requiere un programa urgente de trabajo interdisciplinario para comprender cabalmente los riesgos climáticos diferenciados sobre segmentos específicos de la ruta en el corto, mediano y largo plazo, integrando saberes de la climatología, la ingeniería y la economía. Esto permitirá orientar soluciones



tecnológicas e inversiones hacia los puntos identificados como más críticos para garantizar la operación de este importante corredor vial estatal hasta fines de siglo.

El pronóstico de Trinks et al. (2012) sobre la escalada de eventos hidrometeorológicos adversos alinea la necesidad de integrar sistemas de monitoreo vial, como sugieren Gazzea et al. (2023), y la creación de sinergias entre infraestructura vial y gestión de datos, tal como proponen Hooft & Martin (2023). Estas medidas son fundamentales para una gestión proactiva y basada en datos, permitiendo respuestas oportunas a las amenazas emergentes.

La identificación de sectores críticos en la vía Loja - Catamayo, son áreas propensas a deslizamientos e inundaciones, según Goswami et al. (2006) y Dettinger (2011), requiere un enfoque integral que no solo atienda los riesgos actuales, sino que también prepare la infraestructura para los desafíos futuros. Esto implica la implementación de estrategias de adaptación que contemplen reforzamiento de taludes, mejoras en la canalización de quebradas, y un monitoreo meticuloso de las condiciones meteorológicas, alineándose con las perspectivas ecosistémicas y la necesidad de proteger la biodiversidad en zonas de alta pendiente.

Además, la aplicación de tecnologías satelitales para mapear y evaluar daños potenciales, como lo sugiere Gazzea et al. (2022), y las tecnologías de escaneo e inspección propuestas por Durán et al. (2022), refuerzan la importancia de adoptar enfoques innovadores y tecnológicamente avanzados en la gestión de la infraestructura vial. Estas tecnologías no solo facilitan la identificación de tramos críticos, sino también la priorización de intervenciones.

Además, la evaluación considera escenarios climáticos futuros, revelando una escalada de vulnerabilidad, particularmente bajo el escenario SSP 585, enfatizando la urgencia de implementar medidas de adaptación y planificación integral para la gestión sostenible de la carretera (Kazemzadeh et al., 2023). La longitud de los tramos de carretera se correlaciona directamente con sus niveles de vulnerabilidad, lo que subraya la necesidad de una planificación estratégica para mejorar la resiliencia y la sostenibilidad de la carretera (Masrur et al., 2022).

Los hallazgos subrayan la importancia de integrar la variabilidad entre escenarios y periodos en las estrategias de adaptación climática para la carretera Loja-Catamayo. En particular, las proyecciones en el escenario SSP 585 indican una mayor vulnerabilidad futura, lo que enfatiza

la necesidad de medidas proactivas para mitigar los impactos potenciales (Sun et al., 2022). La evaluación también hace hincapié en la correlación entre la longitud de los segmentos de carretera y la vulnerabilidad, haciendo hincapié en la urgencia de la planificación estratégica para mejorar la resiliencia y la sostenibilidad de las carreteras (Gazzea et al., 2022).

La evaluación de la vulnerabilidad de la carretera Loja-Catamayo aporta información crucial para la toma de decisiones estratégicas en la gestión de la infraestructura. Subraya el imperativo de adaptar y fortalecer la carretera en respuesta a las proyecciones del cambio climático. La investigación futura debe centrarse en modelos dinámicos de cambio climático y tecnologías innovadoras de construcción de carreteras para comprender y mitigar de manera integral la vulnerabilidad de las carreteras a los impactos del cambio climático (Zhou et al., 2022).

La gestión y desarrollo de la Red Vial Estatal E - 35, tramo Loja-Catamayo, en un contexto de cambio climático, demanda una estrategia holística y multidisciplinaria. Esta estrategia debe incorporar no solo aspectos técnicos de la ingeniería vial, sino también consideraciones ambientales, tecnológicas y de gestión de datos. La implementación de políticas de peajes y cargos por congestión, así como la adopción de tecnologías y combustibles limpios, propuestas por Chen et al. (2015) y Amin et al. (2017), respectivamente, son fundamentales para una planificación sostenible y eficiente del transporte. La conjugación de estas soluciones permitirá no solo abordar los desafíos actuales, sino también preparar esta importante arteria vial para los escenarios

### **7.3 Propuesta de adaptación al cambio climático para la Red Vial Estatal, E-35, tramo Loja - Catamayo, a través de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador**

En el escenario SSP 370, la infraestructura en los tramos inicial y final muestra una sensibilidad pronunciada a la exposición y adaptabilidad al cambio climático, subrayando la necesidad inmediata de estabilizar taludes y mejorar drenajes para enfrentar eventos extremos. Este enfoque coincide con las sugerencias de O'Neill et al. (2013) sobre la urgencia de adaptar la infraestructura a las condiciones climáticas cambiantes. Por otro lado, el escenario SSP 585 proyecta daños más severos en toda la vía, lo que implica la necesidad de reforzar la infraestructura vial con mejoras significativas en estabilización de taludes, estructura y carpeta asfáltica, como señalan Wang et al. (2023).

Dada la variabilidad en la vulnerabilidad al cambio climático del tramo Loja-Catamayo en los diferentes escenarios y periodos analizados, Almazroui et al. (2021) sugieren la necesidad de adoptar estrategias de inversión flexibles en infraestructura. Estas estrategias deberían priorizar inicialmente las ubicaciones más vulnerables bajo todos los escenarios considerados. Además, la implementación de políticas de infraestructura resiliente al cambio climático podría reducir significativamente los daños, entre un 19 % y un 35 %, como indican Chandler et al. (2002).

El análisis de múltiples escenarios climáticos refleja una vulnerabilidad continúa en varios tramos de la vía Loja-Catamayo, evidenciando correlaciones entre la longitud de los segmentos y su sensibilidad a eventos extremos, subrayando la complejidad de abordar los riesgos climáticos en la infraestructura vial. Smit y Wandel (2006) advierten que las medidas de adaptación son más efectivas cuando se implementan coordinadamente con otras iniciativas de planificación territorial a escalas complementarias. Además, esta zona geográfica en particular muestra una elevada exposición a los impactos del cambio climático, según indican Sierra et al. (2015), lo que demanda intervenciones específicas.

Los resultados de la encuesta aplicada a técnicos de la Subsecretaría Zonal 7 y Dirección Distrital de Loja del Ministerio de Transporte y Obras Públicas ponen de manifiesto una preocupación generalizada por la vulnerabilidad de la vía Loja-Catamayo frente a eventos climáticos extremos. Esta percepción de urgencia concuerda con diversos estudios que advierten sobre la necesidad de comprender y abordar los riesgos climáticos en redes de transporte (Balijepalli & Oppong, 2014). Los resultados enfatizan la necesidad de medidas concretas para mejorar la resiliencia de la infraestructura, así como de un enfoque holístico que integre participación comunitaria y cooperación internacional.

Estos hallazgos convergen con las recomendaciones de Schweikert et al. (2015) en torno a complementar evaluaciones cuantitativas de vulnerabilidad y adaptación con estrategias integrales para la protección de sistemas viales. Además, varios autores plantean la interrelación que existe entre las dinámicas climáticas y sus impactos en cascada sobre los ecosistemas y medios de vida locales (Cradden & Harrison 2013; Bateman et al., 2020), subrayando así la necesidad de políticas inclusivas ante las amenazas ambientales.

La encuesta confirma la alta vulnerabilidad percibida de la vía Loja-Catamayo ante amenazas como intensas precipitaciones, deslizamientos en zonas adyacentes e interrupciones al tráfico, alineándose con la literatura sobre los impactos del cambio climático en sistemas viales (Koks et al., 2019; Chinowsky et al., 2014). Ante esto, el reforzamiento de drenajes, estabilización de taludes y sistemas de alerta temprana fueron las soluciones priorizadas, congruentes con otros casos (Balijepalli & Oppong, 2014).

Además, la valoración de la cooperación internacional y la inclusión comunitaria converge con estudios que enfatizan la naturaleza sistémica e interrelacionada de los desafíos climáticos para el sector transporte (Chinowsky et al., 2014; Kilewo & Frumence, 2015). En esa línea, la promoción de reforestación en zonas de amortiguamiento fue una medida apoyada por su doble dividendo de reducción de riesgos y beneficios ambientales (Koks et al., 2019).

Los hallazgos refuerzan la necesidad urgente de medidas proactivas e integrales para reforzar la resiliencia climática de esta importante vía regional (Balijepalli & Oppong, 2014). Las soluciones técnicas identificadas deben complementarse con procesos participativos, alianzas interinstitucionales y un enfoque ecosistémico en la planificación de la infraestructura. Solo así será posible mitigar los diversos impactos ambientales que enfrentará esta región bajo un clima cambiante.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) aplicado a las respuestas de la encuesta sobre la vulnerabilidad de la carretera Loja-Catamayo al cambio climático identificó cuatro dimensiones clave: conciencia de amenazas climáticas, mitigación de amenazas específicas, limitaciones sistémicas y soluciones ecológicas. Este análisis destaca tanto la importancia de soluciones técnicas específicas, como el mejoramiento del drenaje y la estabilización de taludes, como el reconocimiento de restricciones presupuestarias y de capacidad institucional. Estos hallazgos, que resaltan la complejidad de abordar la vulnerabilidad climática en infraestructura vial, son coherentes con estudios anteriores como los de Chamorro et al. (2020) y Nelson et al. (2019), que enfatizan la gestión sostenible de riesgos en redes viales y la importancia de evaluar las barreras sistémicas y soluciones técnicas en el contexto del cambio climático.

Esto sugiere que abordar las barreras sistémicas y las soluciones técnicas específicas es crucial para mejorar la resiliencia de la infraestructura vial al cambio climático. La identificación

de barreras sistémicas, como restricciones presupuestarias y falta de coordinación institucional, como obstáculos importantes para una respuesta eficaz al cambio climático, se alinea con el énfasis en evaluar la vulnerabilidad y el riesgo en las redes de transporte (Nelson et al., 2019).

Esto resalta la necesidad de esfuerzos coordinados para abordar las limitaciones sistémicas y la coordinación institucional para mejorar la capacidad de adaptación de la infraestructura vial. Por lo tanto, el análisis del PCA y los estudios relacionados subrayan la naturaleza multifacética de la vulnerabilidad climática y la adaptación en el contexto de la infraestructura vial. Las implicaciones y recomendaciones de la evidencia enfatizan la importancia de comprender las limitaciones sistémicas, las soluciones técnicas específicas y la necesidad de esfuerzos coordinados para abordar las limitaciones de capacidad presupuestaria e institucional para una adaptación efectiva al cambio climático en la infraestructura vial.

El reconocimiento de la propuesta de la importancia de adaptar la infraestructura existente a los impactos del cambio climático se alinea con los hallazgos de Mallick et al. (2015), quienes enfatizaron la necesidad de ajustar proactivamente la infraestructura pública para contrarrestar embates meteorológicos más intensos del cambio climático. Además, el énfasis en garantizar la transitabilidad bajo condiciones cambiantes del clima se alinea con las recomendaciones de Auld et al. (2006) en torno a la evaluación de opciones de refuerzo ante escenarios climáticos futuros. Finalmente, la propuesta destaca los requerimientos de cooperación interinstitucional efectiva, convergiendo con Garmabaki et al. (2021) respecto a la necesidad de coordinación público-privada para viabilizar las inversiones neCésarias en adaptación.

Los cuatro ejes estratégicos de la propuesta, como son: infraestructura resiliente, mitigación de emisiones, desarrollo de capacidades y gobernanza participativa; evidencian un abordaje holístico, atendiendo simultáneamente necesidades de adaptación infraestructural y mitigación de gases de efecto invernadero. Esta perspectiva sistémica concuerda con Engle & Lemos (2010), quienes advierten que los arreglos institucionales son vitales para materializar iniciativas integrales, especialmente cuando involucran escalas territoriales amplias. Asimismo, el énfasis en la participación ciudadana en las decisiones que afectan el futuro colectivo frente al cambio climático converge con los planteamientos de Cabannes (2021) sobre el rol clave de la democracia participativa.

La propuesta resalta las necesidades de financiamiento estable, decisión política sostenida y coordinación interinstitucional para una implementación efectiva de las iniciativas, concordando con los estudios de Kreibich et al. (2015) que enfatizan la importancia de balancear las inversiones en adaptación climática con los beneficios económicos esperados en términos de reducción de daños futuros.

Asimismo, la adaptabilidad continua ante las incertidumbres inherentes de las proyecciones climáticas implica privilegiar opciones flexibles y ajustables en lugar de soluciones rígidas de largo plazo, tal como advierten Wall et al. (2015), destacando así los requerimientos de monitoreo, reporte y verificación permanentes, así como la coordinación institucional, para efectivizar los procesos de mejora e innovación continua que permitan ajustar oportunamente los instrumentos a las condiciones locales específicas.

La propuesta de adaptación para la ruta Loja-Catamayo refleja una comprensión integral de los múltiples desafíos climáticos interrelacionados que enfrenta esta importante conexión vial interregional, congruente con la visión sistémica planteada por Silander (2021) sobre las interacciones entre cambio climático, medios de vida resilientes y seguridad. Asimismo, el enfoque en soluciones coordinadas entre entidades de diferentes niveles resulta imperativo considerando los impactos adversos sobre los recursos hídricos que podrían exacerbar los riesgos para la infraestructura, tal como advierten Lan et al. (2017).

Basándose en estos hallazgos, se hace evidente que la Red Vial Estatal E-35, tramo Loja-Catamayo, requiere medidas específicas, dinámicas y complementarias para proteger la vía de manera efectiva frente a las crecientes amenazas de un clima cambiante e incierto. Esto no solo implica soluciones de ingeniería tradicionales, sino también iniciativas orientadas a la descarbonización del sistema regional de transporte terrestre para abordar de manera integral los desafíos presentes y futuros.

La investigación confirma la vulnerabilidad de esta ruta vital ante el cambio climático. Se requieren urgentemente medidas robustas y multidimensionales para garantizar la transitabilidad futura. Estas intervenciones integrales deben combinar infraestructura resiliente e inteligente, sistemas de alerta temprana, reforestación en las cuencas, así como espacios participativos para las comunidades y financiamiento a largo plazo. Solo la acción coordinada y sostenida de múltiples

actores bajo liderazgos decididos permitirá proteger esta arteria estratégica interregional, asegurando así conectividad, abastecimiento continuo y finalmente el bienestar de millones de ciudadanos vulnerables ante los impactos progresivos del calentamiento global.

El camino hacia la resiliencia climática es arduo pero impostergable. Esta propuesta constituye un primero paso significativo, sentando las bases para una gestión integrada de los activos viales bajo un clima cambiante, incierto, que ahora debe materializarse prontamente sobre el terreno.

## 8 Conclusiones

- El análisis histórico de datos climáticos evidencia que la precipitación y temperatura son factores estresantes que influirán negativamente en la vía Loja-Catamayo como efecto del cambio climático en los próximos 25 años, resaltando la importancia de considerar estos parámetros en la gestión y desarrollo de infraestructura vial sostenible.
- La evaluación de vulnerabilidad actual y futura de la vía Loja-Catamayo demuestra la necesidad crítica de adoptar medidas de adaptación efectivas y un enfoque integral de planificación estratégica para hacer frente a los crecientes riesgos asociados al cambio climático.
- Las proyecciones climáticas para la región durante el siglo XXI subrayan la urgencia de desarrollar estrategias integrales de adaptación que aborden los impactos potenciales en los ecosistemas y la infraestructura, especialmente bajo escenarios de altas emisiones.
- La propuesta de adaptación desarrollada para la vía Loja-Catamayo, basada en cuatro ejes estratégicos y respaldada por la perspectiva de expertos, ofrece un marco práctico y aplicable para reducir la vulnerabilidad de esta vía estratégica ante el cambio climático.
- Este estudio sienta las bases metodológicas para evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura vial ante el cambio climático y desarrollar propuestas de adaptación efectivas, contribuyendo así al avance del conocimiento en este campo y proporcionando herramientas útiles para tomadores de decisiones.
- Los hallazgos de esta investigación tienen implicaciones prácticas significativas para la gestión y mantenimiento de la vía Loja-Catamayo, al identificar los desafíos clave y proponer acciones concretas para mejorar su resiliencia y adaptabilidad frente a las proyecciones de cambio climático.
- Este estudio demuestra la importancia de considerar el cambio climático en la planificación, diseño y gestión de la infraestructura vial y, proporciona una hoja de ruta valiosa para abordar estos desafíos en el tramo RVE E-35 Loja-Catamayo y, potencialmente en otras redes viales vulnerables.



## 9 Recomendaciones

- Llevar a cabo estudios detallados de vulnerabilidad climática en puntos críticos identificados a lo largo de la vía Loja-Catamayo, incluyendo análisis geotécnicos, hidrológicos y de estabilidad de taludes. Estos estudios proporcionarán información valiosa para el diseño de medidas de adaptación específicas y efectivas en los tramos más vulnerables.
- Desarrollar modelos predictivos de deterioro de la infraestructura vial en el tramo Loja-Catamayo bajo diferentes escenarios climáticos futuros, incorporando variables como temperatura, precipitación y eventos extremos. Estos modelos permitirán estimar los costos a largo plazo asociados al cambio climático y fundamentar la toma de decisiones sobre inversiones en adaptación.
- Investigar la aplicabilidad y efectividad de nuevas tecnologías y materiales resilientes al clima para la construcción y mantenimiento de la vía Loja-Catamayo, como pavimentos drenantes, geotextiles y sistemas de monitoreo estructural. Estos estudios contribuirán a identificar soluciones innovadoras para mejorar la resiliencia de la infraestructura vial.
- Evaluar la percepción y disposición de las comunidades locales y usuarios de la vía Loja-Catamayo para participar en iniciativas de adaptación al cambio climático, a través de encuestas, entrevistas y grupos focales. Esta información será crucial para diseñar estrategias de adaptación socialmente aceptables y fomentar la corresponsabilidad en su implementación.
- Analizar el marco normativo e institucional existente en el Ecuador relacionado con la gestión de la infraestructura vial y la adaptación al cambio climático, identificando vacíos, barreras y oportunidades para la integración efectiva de consideraciones climáticas en las políticas y planes sectoriales.
- Desarrollar metodologías para la priorización de inversiones en adaptación de la infraestructura vial, basadas en análisis multicriterio que consideren aspectos como la vulnerabilidad, la criticidad, los costos y los beneficios sociales y ambientales. Estas metodologías serán útiles para optimizar la asignación de recursos limitados y maximizar la resiliencia climática de la red vial.

- Establecer una línea base de indicadores de resiliencia climática para la vía Loja-Catamayo y realizar un seguimiento periódico de su evolución en respuesta a las medidas de adaptación implementadas. Este monitoreo permitirá evaluar la efectividad de las acciones y generar lecciones aprendidas para su replicación en otros contextos.

## 10 Bibliografía

- AAS, (2015). La ciencia del cambio climático: preguntas y respuestas. Academia Australiana de Ciencias, Canberra ACT. [www.science.org.au/climatechange](http://www.science.org.au/climatechange).
- Alizadeh, M. R., Adamowski, J., & Qadir, M. (2022). Multi-scenario multi-objective analysis of downscaled shared socio-economic pathways (ssps) for robust policy development in coupled human-water systems. <https://doi.org/10.5194/hess-2022-297>
- Amin, MSR, Zareie, A., Amador-Jiménez, LE, (2014). Modelado del cambio climático y accidentes de tráfico relacionados con el clima en Canadá. *Transporte. Res. Parte D* 32, 171 y 183.
- Arrhenius, S., (1896). Sobre la influencia del ácido carbónico del aire sobre la temperatura del suelo. *Fil. J. Ciencia.* 41, 239 y 276.
- ASCE, (2009). Principios rectores de la Infraestructura Crítica de la Nación. Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles, Reston, VA. <http://www.pubs.asce.org>.
- Axelsen, C., Grauert, M., Liljegren, E., Bowe, M., y Sladek, B. (2016). Implementing Climate Change Adaptation for European Road Administrations. *Transportation Research Procedia*, 14, 51-57. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.040>
- Azaki, N., y Lutfi, A. (2022). Green Infrastructure Investment Governance: A Literature Review and Lesson for Indonesia. *Technium Social Sciences Journal*, 36, 61-74. <https://doi.org/10.47577/tssj.v36i1.7486>
- Birkmann, J., Cardona, O. D., Carreño, M. L., Barbat, A. H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D. E., Zeil, P., y Welle, T. (2014). Theoretical and Conceptual Framework for the Assessment of Vulnerability to Natural Hazards and Climate Change in Europe<sup>11</sup>This chapter is based on a paper published in *Natural Hazards dealing with the MOVE framework*; see in detail Birkmann et al., 2013. En *Assessment of Vulnerability to Natural Hazards* (pp. 1-19). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410528-7.00001-1>
- Birkmann, J., y Welle, T. (2015). Assessing the risk of loss and damage: Exposure, vulnerability and risk to climate-related hazards for different country classifications. *International Journal of Global Warming*, 8(2), 191. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2015.071963>

- Bles, T., Bessembinder, J., Chevreuil, M., Danielsson, P., Falemo, S., Venmans, A., Ennesser, Y., y Löfroth, H. (2016). Climate Change Risk Assessments and Adaptation for Roads – Results of the ROADAPT Project. *Transportation Research Procedia*, 14, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.041>
- Bollinger, LA, Dijkema, GPJ, (2016). Evaluación de la resiliencia de la infraestructura ante condiciones climáticas extremas, el caso de la red de transmisión de electricidad holandesa. *EUR. J. Infraestructura de Transporte. Res.* 16 (1), 214 y 239.
- Brekke, L., Thrasher, BL, Maurer, EP, Pruitt, T., (2013). Proyecciones climáticas reducidas de CMIP3 y CMIP5: publicación de proyecciones climáticas reducidas de Cmpip5, comparación con información anterior y resumen de las necesidades de los usuarios. [http://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled\\_cmip\\_projections/](http://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip_projections/). \_ (Consultado el 27 de enero de 2020).
- Chamorro, A., Echaveguren, T., Allen, E., Contreras, M., Dagá, J., Solminihac, H. d., ... & Lara, L. E. (2020). Sustainable risk management of rural road networks exposed to natural hazards: application to volcanic lahars in chile. *Sustainability*, 12(17), 6774. <https://doi.org/10.3390/su12176774>
- Chamorro, A., Echaveguren, T., Allen, E., Contreras, M., Dagá, J., Solminihac, H., ... & Lara, L. (2020). Sustainable risk management of rural road networks exposed to natural hazards: application to volcanic lahars in chile. *Sustainability*, 12(17), 6774. <https://doi.org/10.3390/su12176774>
- Chinowsky, P. S., Price, J. C., y Neumann, J. E. (2013). Assessment of climate change adaptation costs for the U.S. road network. *Global Environmental Change*, 23(4), 764-773. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.03.004>
- Chinowsky, P., Hayles, C., Schweikert, A., Strzepek, N., Strzepek, K., y Schlosser, C. A. (2011). Climate change: Comparative impact on developing and developed countries. *Engineering Project Organization Journal*, 1(1), 67-80. <https://doi.org/10.1080/21573727.2010.549608>
- Chinowsky, P., Helman, J., Gulati, S., Neumann, J., Martinich, J., (2019). Impactos del cambio climático en el funcionamiento de la red ferroviaria de EE. UU. *Transporte Pol.* 75, 183 y 191.

- Chinowsky, P., Schweikert, A., Strzepek, N., & Strzepek, K. (2014). Infrastructure and climate change: a study of impacts and adaptations in malawi, mozambique, and zambia. *Climatic Change*, 130(1), 49-62. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1219-8>
- Chinowsky, P., Schweikert, A., Strzepek, N., y Strzepek, K. (2015). Road Infrastructure and Climate Change in Vietnam. *Sustainability*, 7(5), 5452-5470. <https://doi.org/10.3390/su7055452>
- CoastAdapt, (2020). [www.coastadapt.com.au/infographics](http://www.coastadapt.com.au/infographics). (Consultado el 22/03/2020).
- CSIRO, (2020). <https://www.csiro.au/en/Research/OandA/Areas/Assessing-our-climate/ACCESS>.
- de Abreu, V. H. S., Santos, A. S., y Monteiro, T. G. M. (2022). Climate Change Impacts on the Road Transport Infrastructure: A Systematic Review on Adaptation Measures. *Sustainability*, 14(14), 8864. <https://doi.org/10.3390/su14148864>
- De Toscano, G. T. (2009). La entrevista semi-estructurada como técnica de investigación. *Graciela Tonon (comp.)*, 46, 45-73.
- Deimling, T. S. v., Lee, H., Ingeman-Nielsen, T., Westermann, S., Romanovsky, V. E., Lamoureux, S. F., ... & Langer, M. (2021). Consequences of permafrost degradation for arctic infrastructure – bridging the model gap between regional and engineering scales. *The Cryosphere*, 15(5), 2451-2471. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2451-2021>
- Dia, H., (2017). Movilidad baja en carbono para las ciudades del futuro. La Institución de Ingeniería y Tecnología, Londres.
- Donat, MG, Alexander, LV, (2012). La distribución de probabilidad cambiante de las temperaturas globales diurnas y nocturnas. *Cartas de investigación geofísica* 39 (L14707).
- Enríquez-de-Salamanca, Á. (2019). Environmental impacts of climate change adaptation of road pavements and mitigation options. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(6), 691-696. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1326236>
- Environment Australia, 2015. Estrategia nacional de adaptación y resiliencia climática 2015. Departamento de Medio Ambiente y Energía, Canberra. <http://www.environment.gov.au/climate-change/adaptation/strategy>.

- Espinet, X., Schweikert, A., van den Heever, N., y Chinowsky, P. (2016). Planning resilient roads for the future environment and climate change: Quantifying the vulnerability of the primary transport infrastructure system in Mexico. *Transport Policy*, 50, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2016.06.003>
- Espinet, X., y Rozenberg, J. (2018). Prioritization of Climate Change Adaptation Interventions in a Road Network combining Spatial Socio-Economic Data, Network Criticality Analysis, and Flood Risk Assessments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(2), 44-53. <https://doi.org/10.1177/0361198118794043>
- Fakhrudin, B. (SHM), Boylan, K., Wild, A., y Robertson, R. (2020). Assessing vulnerability and risk of climate change. En *Climate Extremes and Their Implications for Impact and Risk Assessment* (pp. 217-241). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814895-2.00012-4>
- Feng, A., y Chao, Q. (2020). An overview of assessment methods and analysis for climate change risk in China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 117, 102861. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102861>
- Fernandes, M., Vieira da Silva, C., y Frazão Santos, C. (2022). Climate-Related Vulnerability and Risk Assessment of Main Ocean Uses: An Overview. *Frontiers in Marine Science*, 9, 787882. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.787882>
- FHWA, (2014). Carreteras en el entorno costero: evaluación de eventos extremos. Circular de Ingeniería Hidráulica No. 25 e Volumen 2. Administración Federal de Carreteras, informe de Washington DC FHWA-NHI-14-006. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/nhi14006/nhi14006.pdf> . \_
- FHWA, (2018). Evaluación de Vulnerabilidad y Marco de Adaptación, 3.ª edición. Administración Federal de Carreteras, Washington DC. [https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resiliency/adaptation\\_framework/chap00.cfm](https://www.fhwa.dot.gov/environment/sustainability/resiliency/adaptation_framework/chap00.cfm) . \_

- Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., ... y White, L. L. (2014). *Cambio Climático 2014: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. Cambridge University Press.
- Foss, E. (2022). Planned vulnerabilities? Street flooding and drainage infrastructure in colonial dar es salaam. *Host – Journal of History of Science and Technology*, 16(1), 29-47. <https://doi.org/10.2478/host-2022-0003>
- Gallina, V., Torresan, S., Critto, A., Sperotto, A., Glade, T., y Marcomini, A. (2016). A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment. *Journal of Environmental Management*, 168, 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>
- Ghosh et al. (2023): Indrajit Ghosh et al. "A systematic review of commercial high concentration antibody drug products approved in the US: formulation composition, dosage form design and primary packaging considerations." *MAbs*. 2023 Jan-Dec
- Givoni, M., Banister, D., (2013). *Hacia una movilidad baja en carbono*. Publicación de Edward Elgar, Cheltenham.
- Gradilla Hernández, L. A., Mendoza Sánchez, J. F., Orantes Olvera, H., y Marcos Palomares, O. A. (2018). Aproximación geoespacial para la adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera en México. *Publicación Técnica*, 523.
- Guest, G., Zhang, J., Maadani, O., & Shirkhani, H. (2019). Incorporating the impacts of climate change into infrastructure life cycle assessments: a case study of pavement service life performance. *Journal of Industrial Ecology*, 24(2), 356-368. <https://doi.org/10.1111/jiec.12915>.
- Hügel, S., y Davies, A. R. (2020). Public participation, engagement, and climate change adaptation: A review of the research literature. *WIREs Climate Change*, 11(4). <https://doi.org/10.1002/wcc.645>
- Hussain, E., Ahmed, S. I., y Ali, M. S. (2018). Modeling the effects of rainfall on vehicular traffic. *Journal of Modern Transportation*, 26(2), 133-146. <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0155-0>

- Hyman, R., Kafalenos, R., & Beucler, B. (2014). Impacts of Climate Change and Variability on Transportation Systems and Infrastructure: Gulf Coast Study, Phase 2: Task 3.1: Screening for Vulnerability (No. FHWA-HEP-14-033). United States. Department of Transportation. Center for Climate Change and Environmental Forecasting.
- I. S., M. B. Y., y. J. I. D. (2019). Concept of Climate Vulnerability: Key Determinants, Responses and Constraints to Climate Change Adaptation. *Advances in Social Sciences Research Journal*, 6(2). <https://doi.org/10.14738/assrj.62.6109>
- Ientile, S., Schmidt, F., Chevalier, C., Orcesi, A., Adelaide, L., & Nedjar, B. (2020). Road network analysis for risk and resilience assessment framework of road infrastructure systems.. <https://doi.org/10.2495/risk200171>
- IIASA, (2020). Base de datos RCP 2.0. Instituto Internacional de Análisis de Sistemas Aplicados, Viena. <http://tntcat.iiasa.ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action¼htmlpageypage¼bienvenido>.
- IPCC, (2007). En: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, KB, Tignor, M., Miller, HL (Eds.), Cambio climático 2007: La base de la ciencia física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY).
- IPCC, (2013). Resumen para formuladores de políticas. En: Stocker, TF, Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, SK, Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, PM (Eds.), Cambio Climático 2013: La Base de la Ciencia Física. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY).
- IPCC, (2014<sup>a</sup>). En: Field, CB, Barros, VR, Dokken, DJ, Mach, KJ, Mastrandrea, MD, Bilir, TE, Chatterjee, M., Ebi, KL, Estrada, YO, Genova, RC, Girma, B., Kissel, ES, Levy, AN, MacCracken, S., Mastrandrea, PR, White, LL (Eds.), Cambio Climático 2014: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Parte A: Aspectos Globales y Sectoriales. Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY).
- IPCC, (2014<sup>b</sup>). En: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schloömer, S., Von Stechow, C., Zwickel, T., Minx, JC (Eds.), Cambio Climático 2014:



- Mitigación del Cambio Climático. Contribución del Grupo de Trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY).
- IPCC, (2018). Calentamiento global de 1,5 C. Informe Especial 15, Comité Internacional de Cambio Climático de la ONU. [www.ipcc.ch/report/sr15/](http://www.ipcc.ch/report/sr15/) .
- IPCC. (2022). *Climate Change and Land: IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems* (1.<sup>a</sup> ed.). Cambridge University Press.<https://doi.org/10.1017/9781009157988>
- ITF, (2016). Adaptación del transporte al cambio climático y al clima extremo: implicaciones para propietarios de infraestructuras y administradores de redes. En: Informes de investigación de la ITF. Publicaciones de la OCDE, París. <https://doi.org/10.1787/9789282108079-es> .
- ITF. (2021). *Travel Transitions: How Transport Planners and Policy Makers Can Respond to Shifting Mobility Trends*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9a83c2f7-en>
- Jaroszweski, D., McNamara, T., (2014). La influencia de la lluvia en los accidentes de tránsito en áreas urbanas: un enfoque de radar meteorológico. *Trav. Comportamiento Soc.* 1, 15 y 21.
- Johnsson, I., y Balstrøm, T. (2021). A GIS-based screening method to identify climate change-related threats on road networks: A case study from Sweden. *Climate Risk Management*, 33, 100344. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100344>
- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J. I., Bates, P., Feyen, L., ... & Ward, P. J. (2012). Comparative flood damage model assessment: towards a european approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(12), 3733-3752. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3733-2012>
- Karam et al. (2020): Karam et al. "Augmenting PDE4B Limits Heart Failure." *Circulation*. 2020; 142:161–174. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.119.042573.
- Kelly, P. M., y Adger, W. N. (2000). Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and Facilitating adaptation. *Climatic change*, 47(4), 325-352.

- Knott, JF, Elshaer, M., Danieal, JS, Jacobs, JM, Kirshen, P., (2017). Evaluación de los efectos del aumento de las aguas subterráneas debido al aumento del nivel del mar en la vida útil de los pavimentos en la infraestructura vial costera. *Transporte. Res. rec.* 2639, 1 y 10.
- Koks, E., Rozenberg, J., Zorn, C., Tariverdi, M., Vousdoukas, M., Fraser, S., ... & Hallegatte, S. (2019). A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10442-3>
- Kwakkel, JH, Haasnoot, M., Walker, WE, (2016). Comparación de la toma de decisiones robusta y las vías de políticas adaptativas dinámicas para el apoyo a la toma de decisiones basado en modelos bajo una gran incertidumbre.
- Laboratorio, Boulder, CO. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/full.html>.
- Li, Y. and Chen, Y. (2018). A new method based on field strength for road infrastructure risk assessment. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2018/6379146>
- Lincke, D., Hinkel, J., (2018). Protección económicamente sólida contra el aumento del nivel del mar en el siglo XXI.
- Lu, Q.-C., Xu, P.-C., y Zhang, J. (2021). Infrastructure-based transportation network vulnerability modeling and analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 584, 126350. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.126350>
- Marcos-García, P. y Pulido-Velázquez, M. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación?. *Ingeniería Del Agua*, 21(1), 35. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361>
- Mavrouli, O., Corominas, J., Ibarbia, I., Alonso, N., Jugo, I., Ruiz, J., ... & Navarro, J. (2019). Integrated risk assessment due to slope instabilities in the roadway network of gipuzkoa, basque country. *Natural Hazards and Earth System Science*, 19(2), 399-419. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-399-2019>
- McNamara, K. E., Clissold, R., Piggot-McKellar, A., Buggy, L., y Azfa, A. (2019). What is shaping vulnerability to climate change? The case of Laamu Atoll, Maldives. *Island Studies Journal*, 14(1), 81-100. <https://doi.org/10.24043/isj.67>
- Mees, H. L. P., Uittenbroek, C. J., Hegger, D. L. T., y Driessen, P. P. J. (2019). From citizen participation to government participation: A n exploration of the roles of local governments

- in community initiatives for climate change adaptation in the Netherlands. *Environmental Policy and Governance*, 29(3), 198-208. <https://doi.org/10.1002/eet.1847>
- Melillo, JM, Richmond, TC, Yohe, GW (Eds.), (2014). Impactos del Cambio Climático en los Estados Unidos: La Tercera Evaluación Nacional del Clima. Programa de Investigación del Cambio Global de EE. UU., pág. 841. <https://doi.org/10.7930/J0Z31WJ2>.
- Melvin, A. M., Larsen, P. H., Boehlert, B., Neumann, J. E., Chinowsky, P. S., Espinet, X., ... & Marchenko, S. S. (2016). Climate change damages to Alaska public infrastructure and the economics of proactive adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(2). <https://doi.org/10.1073/pnas.1611056113>
- Mendoza Sánchez, J., Marcos Palomares, O., y Orantes Olvera, H. (2019). Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México. *Publicación Técnica*, 557.
- Met Office, (2015). Desarrollo de escenarios de cambio climático H  $\beta$  para olas de calor, sequías, inundaciones, vendavales y olas de frío. Met Office, Universidad de Reading y Centro de Hidrología Ambiental (CEH), Exeter. <https://www.theccc.org.uk/publication/met-office-for-the-asc-Developing-h-climate-change-scenarios/>.
- Modelado Ambiental y Software 86, 168 y 183. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.09.017>
- Morán, J.; Novillo, M. (2022). Selección de los Modelos de Proyección para el Cambio Climático del CMIP6 con mejor desempeño para el territorio ecuatoriano. [TESIS]. Escuela Superior Politécnica del Litoral
- Nakamura, K., Hayashi, Y., (2013). Estrategias e instrumentos para el transporte urbano bajo en carbono: una revisión internacional sobre tendencias y efectos. *Política de Transporte* 29, 264 y 274. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2012.07.003>
- Nazarenko, L., Tausnev, N., Russell, G., Rind, D., Miller, R., Schmidt, G., ... & Yao, M. (2022). Future climate change under SSP emission scenarios with GISS-E2.1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 14(7). <https://doi.org/10.1029/2021ms002871>
- NCCAF, (2012). Ocho principios de la planificación de la adaptación. AdaptNote, Centro Nacional de Investigación de Adaptación al Cambio Climático, Brisbane. [https://www.nccarf.edu.au/sites/default/files/attached\\_files\\_publications/AdaptNote.pdf](https://www.nccarf.edu.au/sites/default/files/attached_files_publications/AdaptNote.pdf).

- Neumann, J. E., Price, J. C., Chinowsky, P. S., Wright, L., Ludwig, L., Streeter, R., ... & Martinich, J. (2014). Climate change risks to us infrastructure: impacts on roads, bridges, coastal development, and urban drainage. *Climatic Change*, 131(1), 97-109. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-1037-4>
- Nicholson, AJ, Dalziell, E., (2003). Evaluación y gestión de riesgos: un estudio de confiabilidad de la red vial. En: Bell, MGH, Iida, Y. (Eds.), *La confiabilidad de la red de transporte*. Elsevier, Oxford, págs. 45 y 59.
- NOOA, (2020). Administración Nacional Oceánica y Atmosférica. Investigación del sistema terrestre
- NWS, (2020). Glosario del Servicio Meteorológico Nacional. Servicio Meteorológico Nacional de EE. UU., Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, Silver Spring MD. <https://w1.weather.gov/glossary/>.
- OCDE, (2018). Análisis de costo-beneficio y el medio ambiente: nuevos desarrollos y uso de políticas.
- Oliveira, S., Félix, F., Nunes, A., Lourenço, L., Laneve, G., & Sebastián-López, A. (2018). Mapping wildfire vulnerability in mediterranean europe. testing a stepwise approach for operational purposes. *Journal of Environmental Management*, 206, 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.003>
- Olsen, JR (Ed.), (2015). Adaptación de la práctica de infraestructura e ingeniería civil a un clima cambiante. Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles, Reston, VA. [www.asce.org/publicaciones](http://www.asce.org/publicaciones) .
- Pembuain, A., Priyanto, S., & Suparma, L. B. (2019). The weighting of risk factors for road infrastructure accidents using analytic hierarchy process method. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 9(4), 1275. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.9.4.7523>
- Philp, M., Taylor, MAP, (2017). Agenda de investigación para la movilidad baja en carbono: problemas para las ciudades del Nuevo Mundo. *Revista Internacional de Transporte Sostenible* 11 (1), 49 y 58. <https://doi.org/10.1080/15568318.2015.1106261>
- PIARC, (2015). Marco internacional de adaptación al cambio climático para la infraestructura vial. Informe 2015R03EN. Asociación Mundial de la Carretera, París. [www.piarc.org](http://www.piarc.org).
- Pitilakis, K., Argyroudis, S., Kakderi, K., & Selva, J. (2016). Systemic vulnerability and risk assessment of transportation systems under natural hazards towards more resilient and robust infrastructures. *Transportation Research Procedia*, 14, 1335-1344. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.206>

- Prabhakar, S. V. R. K., Aoki, M., y Mashimo, R. (2013). How Adaptive Policies Are in Japan and Can Adaptive Policies Mean Effective Policies? Some Implications for Governing Climate Change Adaptation. En H. Ha y T. N. Dhakal (Eds.), *Governance Approaches to Mitigation of and Adaptation to Climate Change in Asia* (pp. 103-118). Palgrave Macmillan UK. [https://doi.org/10.1057/9781137325211\\_7](https://doi.org/10.1057/9781137325211_7)
- Prutsch, A., Grothmann, T., Schauser, I., Otto, S., McCallum, S., (2010). Principios rectores para la adaptación al cambio climático en Europa. En: Documento técnico de ETC/ACC 2010/6, The European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC/ACC), Bilthoven, Países Bajos. <http://airclimate.eionet.europa.eu/>. \_
- Prutsch, A., Grothmann, T., Schauser, I., Otto, S., y McCallum, S. (2010). Guiding principles for adaptation to climate change in Europe. *ETC/ACC technical paper*, 6, 32.
- Publicaciones de la OCDE, París. <https://doi.org/10.1787/9789264085169-es>
- Qiao, Y., Santos, J., Stoner, A. M. K., y Flinstch, G. (2020). Climate change impacts on asphalt road pavement construction and maintenance: An economic life cycle assessment of adaptation measures in the State of Virginia, United States. *Journal of Industrial Ecology*, 24(2), 342-355. <https://doi.org/10.1111/jiec.12936>
- RCOA, R. del C. O. (2019). Reglamento al Código Orgánico del Ambiente. *Registro Oficial Suplemento 507 de 12-jun.*
- Rogers, M. (2003). *Highway engineering*. Blackwell Science.
- Rose, SK, (2011). Las vías de concentración representativas: una descripción general. *Cambio Climático* 109, 5 y 31.
- Rychetnik, L., Sainsbury, P., y Stewart, G. (2019). How Local Health Districts can prepare for the effects of climate change: An adaptation model applied to metropolitan Sydney. *Australian Health Review*, 43(6), 601. <https://doi.org/10.1071/AH18153>
- Sağır, H., y Sahal, M. M. (2022). İklim Değişikliğinin Mogadişu' ya Etkileri ve Uygulanabilecek Politika Öncelikleri. *Kent Akademisi*. <https://doi.org/10.35674/kent.1151771>
- Schinko, T., Mechler, R., y Hochrainer-Stigler, S. (2017). A methodological framework to operationalize climate risk management: Managing sovereign climate-related extreme event risk in Austria. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22(7), 1063-1086. <https://doi.org/10.1007/s11027-016-9713-0>

- Schmidt-Thomé, P. (2017). *Climate Change Adaptation* (Vol. 1). Oxford University Press.  
<https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.635>
- Schmidt-Thomé, P., (2017). Adaptación al cambio climático. Enciclopedia de investigación de Oxford sobre ciencia del clima y gestión de riesgos y adaptación.  
<https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.635>.  
<http://climatescience.oxfordre.com/view/10.1093/acrefore/9780190228620.001>
- Schweikert, A., Espinet, X., & Chinowsky, P. S. (2015). Resilience versus risk. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2532(1), 13-20.  
<https://doi.org/10.3141/2532-02>
- Serrao-Neumann, S., Choy, D. L., van Staden, R., Crick, F., Sahin, O., Guan, H., y Chai, G. (2011). *Climate Change Impacts on Road Infrastructure Systems and Services in South East Queensland: Implications for Infrastructure Planning And Management*. 29.
- Shahid, S., y Minhans, A. (2016). CLIMATE CHANGE AND ROAD SAFETY: A REVIEW TO ASSESS IMPACTS IN MALAYSIA. *Jurnal Teknologi*, 78(4).  
<https://doi.org/10.11113/jt.v78.7991>
- Shao, Z. (2017). Assessing the Impacts of Climate Change on Road Infrastructure. *International Journal of GEOMATE*, 13(38). <https://doi.org/10.21660/2017.38.72099>
- Sharma, J., y Ravindranath, N. H. (2019). Applying IPCC 2014 framework for hazard-specific vulnerability assessment under climate change. *Environmental Research Communications*, 1(5), 051004.
- Shi, X., Rew, Y., Ivers, E., Shon, C.-S., Stenger, E. M., y Park, P. (2019). Effects of thermally modified asphalt concrete on pavement temperature. *International Journal of Pavement Engineering*, 20(6), 669-681. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1326234>
- Siebentritt, M., (2016). Comprender el aumento del nivel del mar y el cambio climático, y los impactos asociados en la zona costera. Manual de información de CoastAdapt 2, Centro Nacional de Investigación de Adaptación al Cambio Climático, Gold Coast. [www.coastadapt.com.au](http://www.coastadapt.com.au).

- Skourtos, M., Damigos, D., Kontogianni, A., Tourkolias, C., Markandya, A., Abadie, LM, Sainz de Murieta, E., Galarraga, I., Wellman, J., Hunt, A., (2016). Valores futuros para la evaluación de la adaptación. Entregable 2.2. Proyecto de Investigación ECONADAPT FP7, Unión Europea. [www.econadapt.eu](http://www.econadapt.eu).
- SOCOM, (2020). ¿Qué es un modelo del sistema terrestre (ESM)? <https://socom.princeton.edu/content/what-earth-system-model-esm>.
- Sperling, D., Cannon, J., (2006). Impulsando el Cambio Climático: Reduciendo el Carbono del Transporte.
- Spinoni, J., Barbosa, P., Bucchignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Cescatti, A., ... & Dosio, A. (2021). Global exposure of population and land-use to meteorological droughts under different warming levels and ssps: a cordex-based study. *International Journal of Climatology*, 41(15), 6825-6853. <https://doi.org/10.1002/joc.7302>
- Steckel, J. C., Jakob, M., Flachsland, C., Kornek, U., Lessmann, K., y Edenhofer, O. (2017). From climate finance toward sustainable development finance. *WIREs Climate Change*, 8(1). <https://doi.org/10.1002/wcc.437>
- Stoica-Fuchs, B. (2021). Assessing the vulnerability of transport network to flood hazard using GIS analysis. Case study along Orient-East Med TEN-T Corridor, on Timiș-Cerna Valley, Romania. *Present Environment and Sustainable Development*, 15(2), 146-160. <https://doi.org/10.15551/pesd2021152012>
- Taylor, M. (2017). *Vulnerability analysis for transportation networks*. Elsevier.
- Taylor, M. A. (2020). *Climate Change Adaptation for Transportation Systems*. Elsevier.
- Taylor, MAP, 2017. Análisis de Vulnerabilidad para Redes de Transporte. Elsevier, Oxford.
- Thomas, K., Hardy, R. D., Lazrus, H., Mendez, M., Orlove, B., Rivera-Collazo, I., Roberts, J. T., Rockman, M., Warner, B. P., y Winthrop, R. (2018). Explaining differential vulnerability to climate change: A social science review. *WIREs Climate Change*, 10(2). <https://doi.org/10.1002/wcc.565>
- Thornton, P. K., Ericksen, P. J., Herrero, M., y Challinor, A. J. (2014). Climate variability and vulnerability to climate change: A review. *Global Change Biology*, 20(11), 3313-3328. <https://doi.org/10.1111/gcb.12581>

- Tonmoy, F. (2013). *Assessment of vulnerability to climate change: Theoretical and methodological developments with applications to infrastructure and built environment*.
- TRB, 2016. Manual de capacidad vial, 6.<sup>a</sup> ed. Junta de Investigación del Transporte, Washington DC.
- Twerefou, D., Chinowsky, P., Adjei-Mantey, K., y Strzepek, N. (2015). The Economic Impact of Climate Change on Road Infrastructure in Ghana. *Sustainability*, 7(9), 11949-11966. <https://doi.org/10.3390/su70911949>
- UE, (2018). Adaptación al cambio climático. Políticas, Información y Servicios. Unión Europea. [https://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation_en). (Consultado el 29 de octubre de 2018).
- Underwood, B. S., Guido, Z., Gudipudi, P., y Feinberg, Y. (2017). Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. *Nature Climate Change*, 7(10), 704-707. <https://doi.org/10.1038/nclimate3390>
- van Bijsterveld, W. T., Houben, L. J. M., Scarpas, A., y Molenaar, A. A. A. (2001). Using Pavement as Solar Collector: Effect on Pavement Temperature and Structural Response. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1778(1), 140-148. <https://doi.org/10.3141/1778-17>
- Van Vuuren, DP, Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, GC, Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, SJ,
- VCCCAR, (2018). Definiciones de adaptación al cambio climático. Centro de Victoria para la Investigación de la Adaptación al Cambio Climático. <http://www.vcccar.org.au/climate-change-adaptation-definitions>.
- Velasco-Martínez, L.-C., Martín-Jaime, J.-J., Estrada-Vidal, L.-I., y Tójar-Hurtado, J.-C. (2020). Environmental Education to Change the Consumption Model and Curb Climate Change. *Sustainability*, 12(18), 7475. <https://doi.org/10.3390/su12187475>
- Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1-2), 5-31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>



- Walker, D. A., Raynolds, M. K., Kanevskiy, M., Shur, Y., Romanovsky, V. E., Jones, B. M., ... & Peirce, J. L. (2022). Cumulative impacts of a gravel road and climate change in an ice-wedge-polygon landscape, prudhoe bay, alaska. *Arctic Science*. <https://doi.org/10.1139/as-2021-0014>
- Webb, J. (2011). Making climate change governable: The case of the UK climate change risk assessment and adaptation planning. *Science and Public Policy*, 38(4), 279-292. <https://doi.org/10.3152/030234211X12924093660471>
- Wi, A. (2019). Citizen participation as a key enabler for successful public education policies in climate change mitigation in Singapore. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 28(1), 53-69. <https://doi.org/10.1080/10382046.2018.1430789>
- Wilby, R. L., Troni, J., Biot, Y., Tedd, L., Hewitson, B. C., Smith, D. M., y Sutton, R. T. (2009). A review of climate risk information for adaptation and development planning: Climate Risk Information For Adaptation Planning. *International Journal of Climatology*, 29(9), 1193-1215. <https://doi.org/10.1002/joc.1839>

## 11 Anexos

### **Anexo 1. Encuesta semiestructurada para la investigación de vulnerabilidad del tramo Loja – Catamayo de la RVE e-35 al cambio climático**

Nos encontramos en un momento crucial donde el cambio climático impacta de manera significativa en nuestra región. La Universidad Nacional de Loja, a través de la Maestría de Biodiversidad y Cambio Climático, está comprometida en desarrollar estrategias que nos permitan adaptarnos y mitigar estos desafíos. Su opinión y experiencia desarrollada en el Ministerio de Transporte y Obras Públicas son fundamentales para el éxito de este proyecto.

Por ello, le extendemos una cordial invitación a participar en nuestra encuesta, la cual tiene como objetivo Evaluar la percepción y necesidades de la comunidad en relación con las propuestas de la Subsecretaría Zonal 7 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas para adaptar y mitigar la vulnerabilidad climática en la región.

Su participación no solo contribuirá al fortalecimiento de estas iniciativas, sino también al bienestar y progreso de nuestra comunidad. Agradecemos de antemano su tiempo y colaboración.

1. ¿Está familiarizado con la situación actual de la carretera Loja-Catamayo en relación con la vulnerabilidad climática?
  - Sí
  - No
2. Desde su perspectiva, ¿cuáles son los principales impactos del cambio climático en la vía Loja-Catamayo?
  - Incremento de precipitaciones extremas
  - Incremento de deslizamientos
  - Daños en la infraestructura
  - Interrupciones del tráfico
  - Otro (especifique)
3. ¿Cómo evaluaría la vulnerabilidad actual de la vía Loja-Catamayo ante eventos climáticos extremos?
  - Muy alta
  - Alta
  - Media
  - Baja
  - Muy baja
4. En una escala del 1 al 5, ¿qué tan preparada considera que está la vía Loja-Catamayo para enfrentar los impactos futuros del cambio climático?
  - 1 (Nada preparada)
  - 2
  - 3 (Moderadamente preparada)
  - 4
  - 5 (Totalmente preparada)

5. ¿Qué medidas de adaptación al cambio climático considera prioritarias para la vía Loja-Catamayo?
- Mejora de drenaje
  - Reforzamiento estructural
  - Sistemas de alerta temprana
  - Reforestación
  - Otro (especifique)
6. ¿Qué tan esencial ve el reforzamiento estructural de la vía Loja-Catamayo para aumentar su resiliencia climática?
- Muy neCésario
  - NeCésario
  - Poco neCésario
  - Nada neCésario
7. ¿Considera vital establecer sistemas de monitoreo y alerta temprana para amenazas climáticas en la vía?
- Sí
  - No
8. ¿Qué desafíos percibe para implementar medidas de adaptación al cambio climático en la vía Loja-Catamayo?
- Limitaciones presupuestarias
  - Falta de coordinación interinstitucional
  - Escasez de recursos humanos capacitados
  - Limitaciones técnicas
  - Otro (especifique)
9. ¿Cree que se destinan suficientes recursos económicos para las medidas de adaptación en la vía?
- Sí
  - No
10. ¿Apoyaría un incremento en la inversión pública para la adaptación al cambio climático de la vía Loja-Catamayo?
- Sí
  - No
11. ¿Cómo valora el potencial de colaboración multisectorial para desarrollar soluciones de adaptación en la vía?
- Muy alto
  - Alto
  - Medio
  - Bajo
  - Muy bajo

12. ¿Qué relevancia otorga a la investigación y transferencia tecnológica para la adaptación de la vía?

- Muy alta
- Alta
- Media
- Baja
- Muy baja

13. ¿Ve con buenos ojos la participación del sector privado en alianzas público-privadas para la adaptación de la vía?

- Sí
- No

14. ¿Qué tan efectivas considera las campañas de educación y concientización para la adaptación en la vía?

- Muy efectivas
- Efectivas
- Poco efectivas
- Nada efectivas

15. ¿Considera beneficioso promover la reforestación en zonas de riesgo cercanas a la vía?

- Sí
- No

## Anexo 2. Certificado de traducción del Abstract

Lic. Larry Palacio

Con cédula de identidad 1103982987, certificado como traductor e intérprete en la Senecyt con registro **MDT-3104-CCL-279678**,

### **C E R T I F I C O:**

Que tengo el conocimiento y dominio de los idiomas español e inglés y que la traducción del resumen de la tesis, "**RASGOS ANATÓMICOS DE LA MADERA DE ESPECIES COMUNES DE BOSQUE SECO EN LA RESERVA NATURAL LAIPUNA AL SUR DE ECUADOR**", cuya autoría de los estudiantes Keyla Mabel Cartuche Peralta, con cédula 1106042474, y Cesar Emiliano Feijoo Feijoo, con cédula 1150357778, es verdadero y correcto a mi mejor saber y entender.

Se autoriza a lo interesados hacer uso de la misma para los trámites que crean convenientes.

Emitida en Loja, a los 17 días del mes de mayo de 2023.

Atentamente



Lic. Larry Palacio

**Licenciado en Ciencias de la Educación mención Idioma Inglés**