

6

Resiliencia Del Sistema De Drenaje Vial En El Tramo Lodana – Santa Ana Ante El Cambio Climático

Resilience Of The Road Drainage System On The Lodana – Santa Ana Section In The Face Of Climate Change

Autores

Ken Yandry Menéndez García

Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo , Ecuador

kmenendez9322@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0003-8190-9039>

María Mercedes López Peñarrieta

Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo , Ecuador

mlopez8977@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0001-6196-6058>

Eduardo Tejeda Piusseaut

Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo , Ecuador

eduardo.tejeda@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-0589-9989>

6

Resiliencia Del Sistema De Drenaje Vial En El Tramo Lodana – Santa Ana Ante El Cambio Climático

Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la resiliencia del sistema de drenaje de la carretera Portoviejo–Santa Ana, específicamente en el tramo Lodana-Santa Ana, frente a las afectaciones derivadas del cambio climático. La investigación se desarrolló mediante una metodología que integró inspecciones de campo, revisión de información secundaria y análisis hidrológicos, aplicando el método racional y el método del Soil Conservation Service (SCS) para la estimación de caudales de escorrentía. Se evaluaron variables como la precipitación, cobertura vegetal, características del suelo y capacidad hidráulica de las estructuras de drenaje existentes. Los resultados evidenciaron que alcantarillas, cunetas y canales presentan obstrucciones por sedimentos y vegetación, lo que reduce su eficiencia hidráulica ante eventos de precipitación extrema. Asimismo, los caudales estimados para determinados periodos de retorno superan la capacidad de algunas estructuras. Se concluye que el sistema de drenaje presenta limitaciones frente a eventos hidrometeorológicos intensos, por lo que se recomienda fortalecer las actividades de mantenimiento y considerar criterios de adaptación al cambio climático en la planificación y gestión de la infraestructura vial.

Palabras Clave: Drenaje vial, resiliencia, cambio climático, hidrología

Abstract

The objective of this study was to analyze the resilience of the drainage system of the Portoviejo-Santa Ana highway, specifically in the Lodana-Santa Ana section, in the face of the effects derived from climate change. The research was developed through a methodology that integrated field inspections, review of secondary information and hydrological analysis, applying the rational method and the Soil Conservation Service (SCS) method for estimating stream flows. Variables such as precipitation, vegetation cover, soil characteristics and hydraulic capacity of existing drainage structures will be evaluated. The results showed that sewers, ditches and canals are obstructed by sediments and vegetation, which reduces their hydraulic efficiency in the event of extreme precipitation events. Likewise, the estimated flows for certain return periods exceed the capacity of some structures. It is concluded that the drainage system presents limitations in the face of intense hydrometeorological events, so it is recommended to strengthen maintenance activities and consider adaptation criteria to climate change in the planning and management of road infrastructure.

Keywords: Road drainage, resilience, climate change, hydrology

Nota Editorial: Recibido: 26 de enero 2026 Aceptado: 2 de abril 2026

1. INTRODUCCIÓN

La provincia de Manabí, con una superficie aproximada de 19.427 km², cuenta con una extensa red vial conformada por diferentes tipos de capas de rodadura, que en conjunto alcanzan cerca de 10.781 km de longitud [1]. No obstante, la calidad de las vías y el mantenimiento de su infraestructura hidráulica han constituido históricamente un desafío para las autoridades locales. En este contexto, la carretera Portoviejo - Santa Ana, con una longitud de 19,53 km y una estructura de pavimento flexible, representa uno de los principales ejes de comunicación de la zona central de Manabí, tanto por su relevancia económica como por su papel estratégico en la movilidad interurbana.

El Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) registrado en esta vía en el año 2015 fue de 12.431 vehículos [2], lo que evidencia un volumen significativo de tráfico asociado al transporte de productos agropecuarios, particularmente granos y lácteos, así como a su creciente uso como corredor turístico. Sin embargo, el sistema de drenaje vinculado a esta carretera ha presentado deficiencias en varios tramos, especialmente en sectores como Lodana, donde el mantenimiento insuficiente ha provocado la acumulación excesiva de sedimentos y la inoperatividad de alcantarillas y cunetas.

La resiliencia en infraestructuras de transporte se define como la capacidad de un sistema para resistir, adaptarse y recuperarse ante eventos disruptivos, siendo un componente fundamental para garantizar la continuidad de los servicios esenciales. Las redes viales son altamente vulnerables a amenazas naturales como inundaciones, deslizamientos y eventos extremos, los cuales pueden generar interrupciones parciales o totales en su funcionamiento. En particular, los eventos de inundación representan una de las principales amenazas para la infraestructura vial, ya que pueden provocar la acumulación de sedimentos, erosión de capas estructurales y fallas en los sistemas de drenaje [3].

La evaluación de la resiliencia de las redes viales frente al cambio climático permite identificar vulnerabilidades estructurales y funcionales, así como definir estrategias de adaptación orientadas a mejorar su desempeño ante el incremento en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos. El cambio climático representa un desafío significativo para la infraestructura de transporte urbano, debido a su influencia en los patrones de precipitación y en la ocurrencia de eventos extremos, lo que incrementa el riesgo de fallas en sistemas de drenaje y afecta la operatividad de las redes viales [4].

El cambio climático, reconocido por la comunidad científica como un fenómeno de origen antropogénico y de alcance global, ha intensificado la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, afectando de manera significativa a las infraestructuras viales expuestas [5] [6] [7]. A partir del año 2020, las temperaturas globales se han situado aproximadamente 1,2 °C por encima del promedio de la era preindustrial [8]. En el caso de Ecuador, estos incrementos térmicos han generado desequilibrios atmosféricos que favorecen la ocurrencia de lluvias torrenciales, inundaciones y procesos erosivos. Estudios recientes indican que el 44 % de los desastres naturales registrados en el país están asociados a precipitaciones intensas e inundaciones [9], lo que pone de manifiesto la necesidad urgente de evaluar la capacidad de resiliencia de los sistemas de drenaje vial, aspecto ampliamente abordado en estudios recientes sobre desempeño hidráulico bajo escenarios de cambio climático [10] [11].

En este marco, la presente investigación tiene como objetivo analizar la resiliencia del sistema de drenaje de la carretera Portoviejo - Santa Ana, específicamente en el tramo Lodana - Santa Ana, frente a las posibles afectaciones derivadas del cambio climático. Para ello, se empleó un enfoque basado en la observación directa en campo, la caracterización del terreno y el análisis hidrológico a partir de datos climáticos, con el propósito de diagnosticar el estado actual de las estructuras hidráulicas, identificar sus principales vulnerabilidades y proponer criterios técnicos que contribuyan a mejorar su desempeño y sostenibilidad a largo plazo, considerando enfoques de adaptación de infraestructuras de transporte ante escenarios de cambio climático [12].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló mediante una metodología descriptiva y analítica, basada en tres componentes principales:

- Inspección de campo del sistema de drenaje,
- Análisis hidrológico de las cuencas aportantes y
- Revisión de información secundaria climática e hidrológica

Esto con el fin de evaluar de manera rigurosa las condiciones funcionales del sistema de drenaje del tramo vial Lodana-Santa Ana y su comportamiento ante escenarios asociados al cambio climático.

La observación directa constituyó el eje central de la evaluación del estado físico del sistema de drenaje. Para ello, se realizaron recorridos sistemáticos a lo largo del eje vial, utilizando herramientas de medición convencionales para registrar las dimensiones aproximadas de los elementos de drenaje y determinar pendientes mediante niveles manuales. Asimismo, se identificaron daños visibles como obstrucciones, socavaciones, acumulación de sedimentos y desgaste estructural. Se realizó un reconocimiento de campo a lo largo del tramo vial, mediante observaciones directas que permitieron identificar condiciones de deterioro en las estructuras de drenaje, tales como obstrucciones por sedimentos, acumulación de residuos y presencia de vegetación.

El análisis de la cobertura vegetal circundante se realizó mediante una evaluación visual cualitativa, apoyada en observaciones directas y registros gráficos. Durante los recorridos por las áreas adyacentes a la vía se identificaron las especies predominantes, su densidad y distribución espacial, así como el tipo de vegetación presente en las zonas de influencia del sistema de drenaje, valorando su incidencia en la regulación del escurrimiento superficial y la retención de humedad. Se estimaron de forma aproximada los porcentajes de cobertura vegetal en sectores específicos, evidenciándose una cobertura limitada que, en conjunto con las características de los suelos existentes, favorece un elevado transporte de finos durante períodos de inundación en temporadas lluviosas.

En puntos estratégicos del tramo se excavaron calicatas de pequeña profundidad, observándose características básicas como color, textura y cohesión del material. La textura se determinó mediante el método del tacto, permitiendo una clasificación preliminar en suelos arenosos, limosos o arcillosos. Adicionalmente, se realizaron observaciones cualitativas sobre la capacidad de infiltración, vertiendo agua sobre las muestras y evaluando su velocidad de absorción. Estos criterios permitieron inferir las condiciones de infiltración y la susceptibilidad a procesos erosivos, especialmente en zonas con pendientes pronunciadas o alteraciones del perfil natural del terreno. Aunque no se efectuaron ensayos de laboratorio, se aplicaron criterios técnicos reconocidos para estimar el comportamiento del suelo frente a cargas hidráulicas intensas.

El análisis hidrológico se sustentó en el uso de información secundaria de acceso público, incluyendo registros de precipitación del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), estudios técnicos previos y reportes de entidades locales. Estos datos se complementaron con estimaciones de las condiciones del terreno a lo largo del tramo vial mediante la aplicación de métodos empíricos clásicos, lo que permitió calcular los caudales de diseño para distintos escenarios de precipitación. La evaluación de los resultados evidenció limitaciones en la capacidad hidráulica y en la eficiencia operativa del sistema de drenaje existente frente a eventos de lluvia extrema con diferentes períodos de retorno.

El componente hidrológico se abordó mediante cálculos manuales basados en datos históricos obtenidos de fuentes públicas y reportes técnicos previos. Para cuencas pequeñas se utilizó el método racional, que permite estimar el caudal máximo mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3,6} \quad (1)$$

Donde:

Q = caudal máximo calculado (m³/s)

C = coeficiente de escorrentía (adimensional)

I = intensidad de lluvia (mm/h)

A = área de aportación o drenaje (km²)

Este método resulta adecuado para estimar caudales en estructuras hidráulicas menores, como alcantarillas o ductos cajón, cuando el área de drenaje es inferior a 5 km², de acuerdo con lo señalado por Chow [13]. En el presente estudio, el método racional fue aplicado en las microcuencas identificadas dentro del tramo Lodana–Santa Ana que presentan áreas de drenaje inferiores a dicho umbral, permitiendo estimar los caudales máximos de diseño para distintos períodos de retorno. Sin embargo, para microcuencas de mayor extensión, en las cuales el método racional pierde precisión debido a sus características fisiográficas, se empleó la metodología del Soil Conservation Service (SCS).

El método SCS, desarrollado en 1972, permite estimar las abstracciones de la precipitación de una tormenta, entendidas como los procesos mediante los cuales el agua es retenida o infiltrada antes de generar escorrentía superficial. Este método asume una precipitación homogénea sobre la cuenca, donde la precipitación total (P) se distribuye entre la precipitación efectiva (Pe), la retención del suelo (Fa) y la abstracción inicial (Ia). La relación entre estos componentes se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{Fa}{S} = \frac{Pe}{Pa - Ia} \quad (2)$$

Posteriormente, y con base en estudios experimentales, se ha establecido la expresión particular para la precipitación efectiva:

$$Pe = \frac{(P-0,2 S)^2}{P+0,8 S} \quad (3)$$

Esta formulación se encuentra directamente relacionada con el Número de Curva (CN), un parámetro adimensional comprendido entre 0 y 100, donde valores cercanos a 100 representan superficies impermeables o cuerpos de agua, mientras que valores menores corresponden a suelos naturales con mayor capacidad de infiltración.

En el presente estudio, el método SCS fue aplicado en las subcuencas de los ríos Lodana y Bonce, considerando sus características morfométricas, el uso del suelo y la cobertura vegetal. Los valores del Número de Curva (CN) fueron determinados a partir de esta información, lo que permitió estimar la precipitación efectiva y, posteriormente, los caudales de escorrentía asociados a distintos períodos de retorno.

Debido a que la serie de datos de la estación pluviométrica Lodana M298 presentaba registros incompletos, se procedió a completar la serie mediante la estación patrón UTM - Portoviejo M005, utilizando el método de promedios, de acuerdo con lo propuesto por Campos y Sinichenko [14].

$$\frac{\bar{X}}{\bar{Y}} = \frac{X}{Y} \quad (4)$$

de donde se despeja el valor desconocido:

$$Y = \frac{\bar{Y}}{\bar{X}} * X \quad (5)$$

Los valores de intensidad de precipitación se obtuvieron de registros climáticos de libre acceso, mientras que los coeficientes de escorrentía se determinaron considerando las condiciones del suelo y la cobertura vegetal observadas durante el trabajo de campo. Este procedimiento permitió estimar caudales representativos para distintos escenarios de precipitación y evaluar la capacidad del sistema de drenaje para conducir los volúmenes de agua generados.

Para el tratamiento de la información pluviométrica, se realizó la depuración y completamiento de datos faltantes en las series históricas de precipitación correspondientes a la estación Lodana-M289. Adicionalmente, se efectuó un análisis estadístico de frecuencias utilizando el software Hydrognomon 4, empleando la distribución de probabilidad de Pearson Tipo III, con el objetivo de estimar intensidades de precipitación para diferentes períodos de retorno.

La evaluación del estado de las estructuras de drenaje se realizó mediante una inspección técnica básica. Durante los recorridos de campo se revisaron las alcantarillas, cunetas y canales, documentando parámetros como diámetro, longitud y nivel de obstrucción. Asimismo, se inspeccionó el interior de las alcantarillas para verificar la presencia de elementos que pudieran limitar el flujo hidráulico. La información recopilada se organizó mediante formatos de registro manual, lo que permitió su análisis sistemático.

Finalmente, el análisis del sistema de drenaje incluyó la recopilación y revisión de información secundaria proveniente de informes técnicos, registros históricos de precipitación y cartografía disponible. Estos datos fueron analizados conjuntamente con las observaciones de campo, garantizando que los cálculos y conclusiones reflejaran de manera fiel las condiciones reales del tramo vial en el contexto de la variabilidad climática y el cambio climático.

3. RESULTADOS

El análisis de los registros pluviométricos del tramo Lodana–Santa Ana permite identificar variaciones significativas en la intensidad de las precipitaciones a lo largo del tiempo, lo que evidencia la influencia de fenómenos climáticos de gran escala. En la **Figura 1** se presenta la evolución de la intensidad de lluvia (mm/h) entre 1964 y 2018, donde se destacan varios picos correspondientes a eventos de alta magnitud. En particular, durante los años 1972, 1984, 1997 y 2016 se registraron las mayores intensidades, con valores aproximados de 91,05 mm/h, 91,68 mm/h, 100,48 mm/h y 122,04 mm/h, respectivamente. Estos máximos coinciden con periodos asociados al fenómeno de El Niño, caracterizado por el incremento de la temperatura superficial del océano Pacífico, lo que intensifica las precipitaciones en la región litoral ecuatoriana.

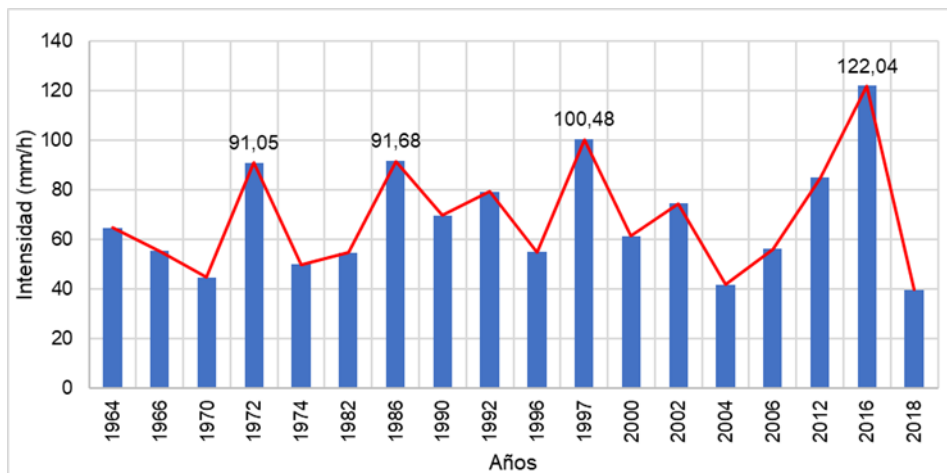


Fig. 1 - Registro de precipitaciones máximas anuales.

Durante el período comprendido entre 2012 y 2018 se observa un incremento notable en la intensidad de las lluvias, superando los valores medios históricos representados por la línea punteada azul. Este comportamiento refleja la variabilidad climática reciente, caracterizada por la ocurrencia de eventos extremos más frecuentes y concentrados en cortos intervalos de tiempo, consistente con estudios que evidencian el incremento de eventos extremos en sistemas de drenaje urbano y vial [10] [6]. Las precipitaciones extraordinarias registradas durante este periodo, especialmente en los meses de febrero y abril, han generado sobrecargas en el sistema de drenaje, evidenciando su limitada capacidad para evacuar caudales elevados.

Con el fin de profundizar el análisis hidrológico, se identificaron cinco puntos críticos a lo largo del tramo vial, seleccionados en función de su relevancia hidráulica y su incidencia en la continuidad del flujo. Entre estos, se incluyen dos zonas con alto volumen de tránsito vehicular, correspondientes a los puentes Lodana y Bonce, los cuales fueron considerados debido a su papel como secciones de control dentro del sistema de drenaje, tal como se ilustra en la Figura 2.

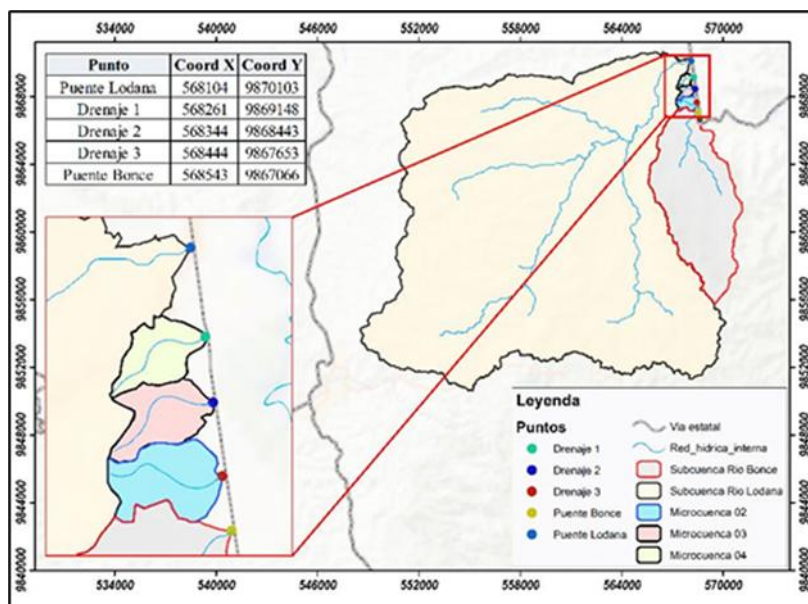


Fig. 2 - Puntos de interés en el tramo Lodana-Santa Ana.

La Tabla 1 presenta las áreas de drenaje asociadas a las subcuencas y microcuencas identificadas en el área de estudio.

Tabla 1- Áreas de drenaje (km²)

Aportantes	Área (km ²)
Subcuenca Río Lodana	291,4
Microcuenca 02	0,79
Microcuenca 03	0,59
Microcuenca 04	0,50
Subcuenca Río Bonce	37,1

Considerando que el área de drenaje constituye una limitante fundamental para la aplicación de los métodos de estimación de caudales, el análisis hidrológico se segmentó en dos categorías. Las áreas de drenaje menores a 5 km² (Microcuenca 02, Microcuenca 03 y Microcuenca 04) fueron evaluadas mediante el método racional, mientras que las subcuencas de los ríos Lodana y Bonce se analizaron empleando el método del Soil Conservation Service (SCS), aplicando el parámetro del Número de Curva (CN) [15]. Los resultados obtenidos para las microcuencas analizadas mediante el método racional se presentan en la Tabla 2, considerando períodos de retorno (TR) de 10 y 25 años.

Tabla 2- Caudales calculados para cada microcuenca

Id microcuenca	Área (km ²)	Pendiente	Tiempo de concentración	Caudal Tr 10	Caudal Tr 25
		m/m	n	m ³ /s	m ³ /s
Microcuenca 02	0,79	1,32	29,1	2,6	2,8
Microcuenca 03	0,59	1,22	31,9	2,1	2,3
Microcuenca 04	0,50	1,62	28,2	1,6	1,7

Para la obtención de estos resultados se utilizaron intensidades de precipitación proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), correspondientes a la estación homogenizada UTM - Portoviejo M005. Se consideraron intensidades máximas en 24 horas de 3,85 mm/24 h para un período de retorno de 10 años y de 4,84 mm/24 h para un período de retorno de 25 años.

El coeficiente de escorrentía ponderado se determinó considerando principalmente áreas de cultivos y cobertura boscosa. Para la Microcuenca 02 se obtuvieron valores de C para TR 10 y TR 25 de 0,411 y 0,444, respectivamente; para la Microcuenca 03 se calcularon valores de 0,399 y 0,433; mientras que para la Microcuenca 04 se determinaron coeficientes de 0,408 y 0,438. En términos relativos, estos resultados evidencian una capacidad de respuesta hidrológica moderada a favorable.

El INAMHI proporciona ecuaciones de intensidad–duración–frecuencia (IDF) validadas para cada estación y sus respectivas zonas de influencia. En este caso, y en función del tiempo de concentración determinado para las microcuencas analizadas, se empleó la siguiente ecuación:

$$I = 175,897 * I_{TR}^{0,2692} * t_c^{-0,8418} \quad (6)$$

Por otra parte, el análisis de las subcuencas de los ríos Lodana y Bonce, realizado mediante la metodología del Soil Conservation Service (SCS), permitió determinar en primera instancia los valores del Número de Curva (CN), obteniéndose valores de 82,49 para la subcuenca del río Lodana y de 82,19 para la subcuenca del río Bonce. Estos resultados se derivaron de un análisis integrado que consideró información georreferenciada sobre el uso del suelo y la cobertura vegetal, en concordancia con parámetros orográficos obtenidos a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE) con resolución espacial de 5 × 5 m, extraídos del portal institucional SigTierras.

Los valores de CN obtenidos indican un elevado grado de impermeabilidad en ambas subcuencas, siendo más pronunciado en la subcuenca del río Lodana, lo que refleja una menor capacidad de retención de las aguas provenientes de la precipitación. En la **Figura 3** se evidencia la distribución espacial del Número de Curva en ambas subcuencas, observándose que las zonas media y baja presentan valores elevados de CN, asociados a una baja capacidad de infiltración, en contraste con las áreas altas, donde se registran valores menores de CN vinculados a la conservación de la cobertura vegetal autóctona, particularmente bosques secos.

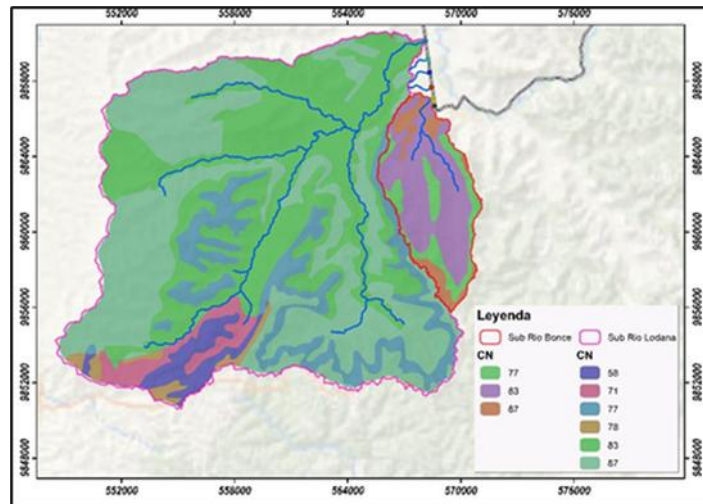


Fig. 3- Distribución espacial del CN en subcuencas de análisis

De manera simultánea, se realizó el relleno de los datos faltantes de las series de registros pluviométricos de la estación Lodana-M289, ajustando los parámetros mediante pruebas de consistencia y análisis estadísticos, cuyos resultados se reflejan en la Figura 1. A partir de esta información, se llevó a cabo un análisis probabilístico empleando el software *Hydrognomon 4*, utilizando la distribución de Pearson Tipo III para la proyección de intensidades de precipitación, obteniéndose valores de 92,43 mm/h y 118,47 mm/h para períodos de retorno de 10 y 25 años, respectivamente.

Con base en estos resultados y considerando períodos de retorno de hasta 1000 años, se consolidó la curva de Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF), lo que permitió la elaboración de los hietogramas de diseño mediante la aplicación del criterio de Bloques Alternos, proporcionando insumos fundamentales para el análisis hidrológico y el dimensionamiento del sistema de drenaje.

Cabe indicar que, para ambas subcuencas, se aplicó un Factor de Reducción Areal (FRA) en la construcción del hietograma, considerando que la precipitación no es homogénea en toda la extensión de la cuenca. Para ello, se utilizó una ecuación empírica en función del área de la cuenca y la duración de la tormenta, adoptándose una tormenta de diseño de 2 horas:

$$FRA = 1 - e^{-1.1D^{0.25}} + e^{-1.1D^{0.25} - 38.61 \cdot 10^{-4}A} \quad (7)$$

De este modo, se obtuvo un valor de FRA = 0,817 para la subcuenca del río Lodana y FRA = 0,963 para la subcuenca del río Bonce.

El análisis hidrológico se realizó en el software HEC-HMS [16], aplicando los criterios previamente descritos. Para la subcuenca del río Lodana, se consideró una longitud de recorrido (L_c) de 39,9 km, una pendiente promedio (S) de 0,67 %, un perímetro (P) de 90,1 km y un tiempo de concentración t_c de 383,7 minutos. En consecuencia, el tiempo de retardo (L_r) (Lag Time), equivalente al 60 % del tiempo de concentración, fue de 270,22 minutos. Bajo estas condiciones, se obtuvo un caudal pico de 49,9 m³/s para un período de retorno de 10 años (Tr_{10}). Por su parte, para un período de retorno de 25 años (Tr_{25}), manteniendo las mismas características morfométricas y variando únicamente el hietograma de frecuencia, el caudal resultante fue de 107,4 m³/s.

En la subcuenca homóloga se registró una longitud de recorrido de 13,5 km, una pendiente promedio de 0,9 %, un perímetro de 30,9 km y un tiempo de retardo de 65,3 minutos. A partir de estos parámetros, se estimaron caudales de 17,2 m³/s para un Tr_{10} y de 35,9 m³/s para un Tr_{25} .

Es de suma importancia destacar los caudales generados por los aportes laterales al tramo vial estudiado, ya que, en un análisis de resiliencia, la capacidad de la infraestructura para soportar crecidas y eventuales desbordamientos resulta un aspecto crítico. Esta información es fundamental para evaluar la capacidad del sistema vial frente a eventos hidrometeorológicos extremos, los cuales tienden a intensificarse y a presentarse con mayor frecuencia bajo escenarios de cambio climático.

Finalmente, se presenta de manera esquemática la disposición de las estructuras hidráulicas a lo largo del tramo de la vía como se muestra en la **Figura 4**. Cabe señalar que, al momento de la ejecución de la presente investigación, no fue posible determinar las geometrías de las secciones de los ríos, debido a que uno de ellos se encontraba en proceso de intervención y el otro presentaba condiciones de obstrucción por maleza y presencia de aguas residuales.

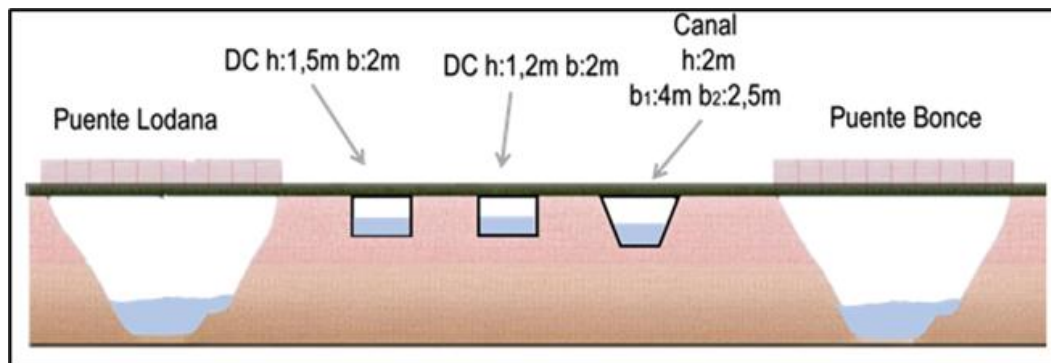


Fig. 4- Estructuras hidráulicas en el tramo Lodana - Santa Ana

Las estructuras de drenaje tipo ducto cajón, que forman parte del sistema de evacuación de las aguas provenientes de las quebradas, cumplen con el análisis hidrológico planteado. De igual manera, el canal trapezoidal integrado al sistema de canales de Poza Honda presenta un comportamiento adecuado [17]. Por otro lado, las secciones transversales de los ríos resultan hidráulicamente eficientes; sin embargo, las precipitaciones registradas durante el año 2025, las cuales fueron de carácter extraordinario, especialmente en las zonas centro y centro-sur de la provincia, provocaron el desbordamiento del río Lodana. En este contexto, se considera que, ante eventos de tal magnitud, cualquier configuración de sección transversal o incluso el mejoramiento de muros laterales habría sido, en términos teóricos, insuficiente para contener los caudales generados.

El análisis de las secciones hidráulicas (de izquierda a derecha) considera caudales típicos bajo condiciones de pendiente del 1 % y un coeficiente de rugosidad del hormigón de $n = 0,013$, obteniéndose capacidades de $11,6 \text{ m}^3/\text{s}$, $8,7 \text{ m}^3/\text{s}$ y $30,20 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Estos valores superan los caudales estimados mediante las ecuaciones empíricas y la bibliografía consultada, lo que confirma la adecuación hidráulica de dichas secciones bajo condiciones de diseño convencional.

Es importante señalar que el tramo analizado no dispone de cunetas (cintas goteras) claramente definidas, presentando únicamente un sistema de evacuación superficial mediante bombeo con peralte transversal, el cual induce la acumulación de las aguas hacia uno de los márgenes de la vía. Asimismo, no se evidencian estructuras de drenaje adicionales a lo largo del tramo estudiado.

4. CONCLUSIONES

En relación con la evaluación de la resiliencia del sistema de drenaje del tramo vial Lodana–Santa Ana, el análisis realizado permitió evidenciar que el sistema presenta un comportamiento hidráulico aceptable bajo condiciones de precipitación ordinaria; sin embargo, su capacidad resulta insuficiente frente a eventos de lluvia de alta intensidad asociados a la variabilidad climática y al cambio climático, en concordancia con estudios regionales sobre infraestructura de transporte en América Latina [7]. Esta limitación incrementa la vulnerabilidad de la vía ante inundaciones, socavaciones y procesos erosivos.

En cuanto al diagnóstico del estado físico de las estructuras hidráulicas, las inspecciones de campo demostraron que una proporción significativa de las alcantarillas, cunetas y canales carece de mantenimiento periódico, lo que ha favorecido la acumulación de sedimentos, residuos sólidos y vegetación. Estas condiciones reducen la sección hidráulica efectiva y disminuyen la eficiencia del sistema de drenaje, afectando su funcionalidad durante eventos extremos, en concordancia con lo reportado por Abreu y Velásquez [17].

Respecto al análisis hidrológico desarrollado, los resultados obtenidos mediante la aplicación de los métodos Racional y del Soil Conservation Service (SCS) evidenciaron que los caudales máximos de diseño superan la capacidad de descarga de varias estructuras existentes, especialmente en microcuencas con elevados aportes de escorrentía superficial. Esto confirma que el sistema actual no garantiza una respuesta resiliente ante precipitaciones extraordinarias.

Finalmente, en función del análisis del comportamiento hidrológico de las subcuencas, los valores elevados del Número de Curva (CN) determinados en las cuencas de los ríos Lodana y Bonce reflejan condiciones críticas, particularmente en sus zonas medias y bajas, caracterizadas por baja permeabilidad. Esta condición está asociada a la pérdida de cobertura vegetal y a la expansión de actividades urbanas y agrícolas, lo que incrementa la escorrentía superficial y reduce la capacidad natural de infiltración.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar un plan integral de gestión y mantenimiento del sistema de drenaje vial, que incluya actividades periódicas de limpieza de alcantarillas, cunetas y canales, con el fin de evitar la acumulación de sedimentos, residuos sólidos y vegetación que reduzcan la capacidad hidráulica de las estructuras.

Es necesario evaluar y redimensionar las estructuras hidráulicas críticas, considerando caudales de diseño asociados a mayores períodos de retorno y escenarios de precipitación extrema, de manera que el sistema pueda adaptarse a las condiciones impuestas por el cambio climático.

Se sugiere incorporar prácticas de manejo ambiental y restauración de la cobertura vegetal, especialmente en las zonas medias y altas de las subcuencas, mediante reforestación y control del uso del suelo, con el propósito de reducir la escorrentía superficial, favorecer la infiltración y mitigar procesos erosivos.

Asimismo, se recomienda establecer un sistema de monitoreo hidrometeorológico y técnico continuo, que permita evaluar de forma permanente el comportamiento del drenaje y anticipar posibles fallas estructurales durante eventos de lluvia intensa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CONGOPE, Banco Interamericano de Desarrollo, & Prefectura de Manabí, Plan de Desarrollo Vial Integral de la Provincia de Manabí, CONGOPE, 2019. Disponible en: <https://www.congope.gob.ec/>
2. J. Molina and L. King, Determinación de las características de tránsito enmarcadas en el Tráfico Promedio Diario Anual (TPDA) espectro de carga y ancho de vía, en las arterias viales E30 Manta-Portoviejo, E30 Rodeo-Portoviejo, E39A Rocafuerte-Portoviejo y E462B Santa Ana-Portov, 2015. Disponible en: <http://hdl.handle.net/123456789/167>
3. Y. Zeleke, M. Tira and C. Scaini, "Resilience of road networks to natural hazards: A systematic," *Transportation Engineering*, vol. 23, no. 100420, 2026. doi: <https://doi.org/10.1016/j.treng.2026.100420>
4. S. Begum, R. Fisher, E. Ferranti and A. Quinn, "Evaluation of climate change resilience of urban road network strategies," *Sustainability*, vol. 14, no. 2650, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7110146>
5. J. Mendoza, Canales de impacto del cambio climático en la infraestructura vial, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2023. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/68756-canales-impacto-cambio-climatico-la-infraestructura-vial>
6. L. Sañudo-Fontaneda, I. Andrés-Doménech and J. Rodríguez-Hernández, "Adaptación de infraestructuras de drenaje urbano ante el cambio climático: revisión de metodologías y criterios de diseño," *Ingeniería del Agua*, vol. 23, no. 3, pp. 155-170, 2019. doi: <https://doi.org/10.4995/ia.2019.11402>
7. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Infraestructura y cambio climático en América Latina: riesgos, vulnerabilidad y adaptación en el sector transporte, 2021. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46879-infraestructura-cambio-climatico-america-latina-riesgos-vulnerabilidad>
8. Organización de las Naciones Unidas (ONU), El aumento de las temperaturas mundiales es alarmante, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), 2021. Disponible en: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-aumento-de-las-temperaturas-mundiales-es-alarante>
9. A. Awudu, M. Loayza, J. Espinoza and L. Vargas, "Análisis probabilístico de inundaciones en función de los drenajes existentes en vías de primer orden," *Revista Ciencia y Construcción*, vol. 5, no. 1, pp 16-29, 2024. Disponible en: <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/223/147>
10. Banco Interamericano de Desarrollo, Infraestructura resiliente: marco para el desarrollo de infraestructura resiliente al clima, 2019. Disponible en: <https://publications.iadb.org/es/infraestructura-resiliente-marco-para-el-desarrollo-de-infraestructura-resiliente-al-clima>
11. S. Mopoung and P. Chusak, "Assessment of road drainage performance under changing rainfall patterns using HEC-RAS and SWMM modeling," *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 27, no. 5, p. 04022012, 2022. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002160](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002160)
12. L. García, "Metodología de análisis de adaptación al cambio climático de infraestructuras de transporte," *Revista Digital del CEDEX*, vol. 197, 2020. Disponible: <https://www.cedex.es/>
13. V. Chow, Hidrología aplicada, 1.^a ed., McGraw-Hill, 1994. Disponible en: <https://www.worldcat.org/title/247414473>
14. A. Campos and E. Sinichenko, Características de sistemas fluviales pequeños y recursos hídricos de la demarcación hidrográfica de Manabí, perspectivas de desarrollo, Moscú: Universidad de Rusia de la Amistad de los pueblos de Rusia, 2017.
15. USDA Natural Resources Conservation Service, Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55), United States Department of Agriculture, 1986. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/UrbanHydrologyTR55.pdf>
16. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual, Hydrologic Engineering Center, 2021. Disponible en: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_4.9.pdf
17. E. Rodríguez, L. De la Cadena and A. Ureta, Las inundaciones en la cuenca del río Portoviejo ¿Un asunto resuelto?, 2020. Disponible en: <https://www.avsf.org/app/uploads/2025/02/inundaciones-rio-portoviejo.pdf>
18. D. Abreu and M. Velásquez, "Evaluación de la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático de las estructuras de drenaje en carreteras," *Revista Ciencia y Construcción*, vol. 4, no. 1, pp. 37-47, 2023. doi: <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/172/120>