

Evaluación De La Vulnerabilidad A Los Efectos Del Cambio Climático De Las Estructuras De Drenaje En Carreteras

Evaluation Of The Vulnerability To The Effects Of Climate Change Of Drainage Structures On Highways

Autores

Manuel Arturo Velásquez Rodríguez¹, Dania Olga Abreu Hernández²

¹ Ingeniero Civil. Universidad Técnica de Manabí (UTM) mvelasquez6915@utm.edu.ec

² Doctor en Ciencias Pedagógicas, Ingeniero Aerofotogeodesta. Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae). daniah@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

En el presente artículo se estudian cuatro alcantarillas de diferente tipología, ubicadas en la carretera que une los cantones Portoviejo y Pichincha de la provincia de Manabí con la finalidad de conocer su grado de vulnerabilidad ante eventos meteorológicos extremos como consecuencia de los efectos del cambio climático. Mediante la recopilación de datos históricos de precipitaciones obtenidos en las estaciones meteorológicas más próximas al lugar de estudio, se desarrolla la ecuación de intensidad duración frecuencia (IDF) propia de las cuencas aportantes, posteriormente mediante software especializado se evaluó la capacidad de evacuar los caudales producidos ante diferentes intensidades de precipitación generados por periodos de retorno de 10, 25, 50 100 y 500 años que suponen condiciones meteorológicas de lluvias extremas, simulando efectos del cambio climático. Luego de la evaluación se pudo comprobar que para periodos de retorno de 10 años, el 75% de las alcantarillas evaluadas trabajaban sumergidas a la entrada y que a partir de lluvias con un periodo de retorno de 50 años se empiezan a generar desbordamientos del agua sobre la calzada, adicionalmente en todas las condiciones evaluadas se presentaron velocidades de descarga erosivas.

Palabras claves: alcantarilla, cambio climático, drenaje, vulnerabilidad.

ABSTRACT

This article studies four sewers of different types, located on the road that connects the cantons Portoviejo and Pichincha in the province of Manabí in order to know their degree of vulnerability to extreme weather events as a result of the effects of climate change. Through the collection of historical rainfall data obtained in the meteorological stations closest to the place of study, the equation of intensity duration frequency (IDF) of the contributing basins is developed, later by means of specialized software the capacity to evacuate the flows produced before different precipitation intensities generated by return periods of 10 was evaluated, 25, 50 100 and 500 years that involve meteorological conditions of extreme rainfall, simulating effects of climate change. After the evaluation it was possible to verify that for return periods of 10 years, 75% of the evaluated sewers worked submerged at the entrance and that from rains with a return period of 50 years they begin to generate water overflows on the road, additionally in all the conditions evaluated erosive discharge speeds were presented.

Keywords: sewer, climate change, drainage, vulnerability.

Nota Editorial: Recibido: Enero 2023 Aceptado: Febrero 2023

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es un fenómeno asociado a las modificaciones del clima evidenciadas a nivel global por el aumento de la temperatura del planeta y la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos. Entre sus múltiples consecuencias en la dinámica de la vida en el planeta, se pueden identificar algunas que en el orden tecnológico afectan a la infraestructura de objetos y medios necesarios para el desarrollo social.

Las carreteras constituyen uno de los elementos más afectados por el cambio climático, dado el nivel de exposición a diferentes fenómenos naturales, si se tiene en cuenta que se ubican en grandes extensiones del terreno, lo que las hace más vulnerables que otros objetos ubicados de forma puntual.

La vulnerabilidad de carreteras a efectos del cambio climático es una preocupación global, y encargo social de diferentes organizaciones que agrupan a especialistas que a nivel internacional o regional deben dar soluciones para contar con carreteras resilientes que puedan soportar los embates frecuentes de fenómenos naturales. La Asociación Mundial de carreteras (PIARC) en el Marco Internacional de Adaptación de la infraestructura de carreteras ante el cambio climático, propone se desarrollen acciones para mitigar los efectos negativos en las carreteras, en las que se promoció el empleo de nuevas tecnologías, medios de transporte adecuados, y la supervisión permanente de taludes, laderas, accidentes, interrupciones de servicios y de todos los parámetros que debiliten la funcionalidad de la vía [1].

Para esto se trazan políticas y se realizan acciones específicas en dependencia de las condiciones objetivas presentes en cada país. En Ecuador, los principales fenómenos que ocurren están relacionados con los sismos y las fuertes precipitaciones. Este último provocando inundaciones y pérdida de la funcionalidad de la carretera.

En las más recientes visitas realizadas a carreteras de la provincia de Manabí, se ha podido constatar que entre los problemas existentes se encuentran el funcionamiento del sistema de drenaje, pues como consecuencia del cambio climático se ha modificado el régimen de precipitaciones provocando caudales superiores a los previstos, reduciendo la capacidad hidráulica de las alcantarillas.

Atendiendo a esto se realizó un estudio del sistema de drenaje transversal en la carretera que une los cantones Portoviejo y Pichincha, en la provincia de Manabí. Se consideraron los eventos de lluvias extremas y sus posibles efectos en 4 alcantarillas seleccionadas de forma intencionada.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El tramo de vía en estudio está ubicado entre la Parroquia Rural San Plácido y el sitio Mancha grande en la vía que une los cantones Portoviejo y Pichincha de la provincia de Manabí.

La zona en estudio está cubierta de bosque natural y áreas de cultivos con precipitaciones que alcanzan su máximo entre los meses de enero a abril.

En el tramo comprendido entre las estaciones 30+220 al 31+420 se escogieron 4 alcantarillas de diferentes diámetros, materiales y características de la cuenca aportante. La ubicación del área de estudio se presenta en la figura 1 e información relevante de las alcantarillas seleccionadas se incluyen en la tabla 1.

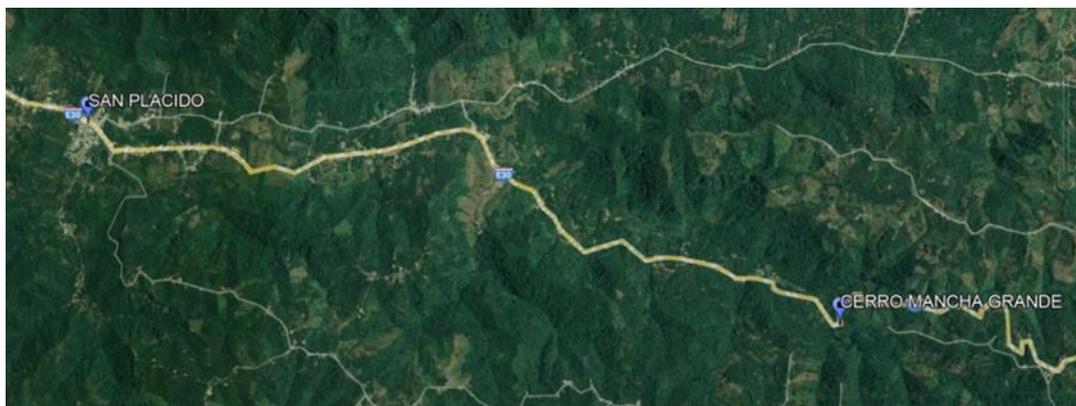


Figura 1: Localización del tramo en estudio
Fuente: Imagen tomada de Google Earth

Tabla 1: Características de las alcantarillas en estudio

Alc.	Abscisa	Coordenadas de Ubicación		Sección	Material
		x	y		
1	30+220	586513	9882504	Alc. 1200mm	Hormigón
2	30+410	586705	9882535	Alc. 1800mm	Acero Corrugado
3	31+200	587463	9882762	Alc. 1500mm	Hormigón
4	31+420	587673	9882835	Alc. Doble de 1000mm	Hormigón

2.2. DETERMINACIÓN DE CAUDALES HIDROLÓGICOS

2.2.1. IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS APORTANTES

Para la identificación de las cuencas aportantes, primero fue necesario la obtención del modelo digital de elevación, el mismo se obtuvo mediante técnicas de aerofotogrametría utilizando una aeronave no tripulada, dron marca DJI modelo PHANTOM 4PRO V2.0, equipado con cámara de 20 megapíxeles en base a las recomendaciones de Ospina [2]. Los vuelos fueron planificados en el software PIX4DCapture, siguiendo los más eficaces métodos fotográficos para obtener una nube de puntos densa, modelo digital de terreno y orto mosaico de calidad. Las misiones en tierra se configuraron con parámetros que optimicen la toma de fotografías aéreas, con ángulo 90° y traslapes de fotografías frontal (Overlap) 75% y de gran importancia para que existan puntos de características comunes, los cuales son correlacionadas y triangulados para determinar la posición de cada uno de los miles de puntos que conforman la nube y así reconstruir el modelo digital de elevaciones en el Software Agisoft PhotoScan con el procesamiento de 1403 imágenes a una altura media de vuelo de 200 metros para obtener una resolución de terreno de 5,42 cm por pixel cubriendo una superficie de 5.84 km², con una densidad de 21 puntos por m².

Una vez obtenido el modelo digital de elevación, con la ayuda de las herramientas que ofrece el software ArcMap en su versión 10.4 se obtuvo la red hídrica y la delimitación de las cuencas drenantes en las alcantarillas de estudio. Figura 2.



Figura 2: Identificación de cuencas aportantes
Elaborada por: Autores

2.2.2. PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DEL CAUDAL HIDROLÓGICO

Los caudales de crecida se obtuvieron mediante el método racional el que es aplicado para cuencas pequeñas con superficies menores a 5 km² [3] y para lo cual se consideraron periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 500 años. La ecuación del método racional es:

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

Donde Q es el caudal máximo en metros cúbicos por segundo; I es la intensidad de la precipitación en milímetros por hora para una duración igual al tiempo de concentración; A es el área de la cuenca, en kilómetros cuadrados, C es el coeficiente de escorrentía.

El coeficiente C se escogió de las tablas propuestas por Chow [4]. Relacionando las características topográficas, la cobertura y el periodo de retorno.

Se definió una intensidad de tormenta para periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 500 años y una duración igual al tiempo de concentración que fue calculado mediante la ecuación propuesta por Kirpich que indica

$$t_c = 0,06628 \left(\frac{L}{S^{0,5}} \right)^{0,77} \quad (2)$$

Donde L es la longitud del cauce principal en kilómetros, S es la pendiente del cauce principal en metros sobre metros.

Para determinar la ecuación de Intensidad de precipitación, en primer lugar se analizó el área de estudio e identificó la existencia de 3 estaciones meteorológicas descritas en la tabla Nro. 2, que son cercanas y proporcionan información confiable relacionada a los registros históricos de precipitaciones desde el año 1990 al 2012, mediante la toma de datos con pluviómetros que miden las alturas de agua de las precipitaciones, cuya superficie receptora es un anillo de doscientos centímetros cuadrados de superficie, bajo la suposición que las precipitaciones están uniformemente distribuidas sobre una superficie horizontal impermeable y que no están sujetas a evaporación. Se mide las precipitaciones a una altura de un metro con veinte centímetros para evitar corrientes turbulentas a baja altura y salpicado en la superficie terrestre [5].

Tabla 2: Ubicación de estaciones meteorológicas

CODIGO	ESTACION	COORDENADAS		ALTURA
		ESTE	NORTE	
M454	Río Chico en Alajuela	579146	9854384	72
M460	Mancha grande	589861	9881733	181
M464	Río Chamotete – Jesús María	586290	9886407	95

La estación que brinda la mayor cantidad de información es Río Chamotete - Jesús María (M464) y está ubicada a 4 km del área de estudio, sin embargo para las series anuales con datos no observados, se emplearon regresiones lineales que permitió correlacionar información entre las estaciones vecinas, cuyas características físico climáticas tienen similitud, finalmente los meses en los que no existía datos, se procedió a obtener el promedio mensual de todo el periodo ya que la cantidad de datos faltantes no superaba el 10%.

Con la información de las precipitaciones mensuales máximas obtenidas de los registros pluviométricos, y en función de las experiencias obtenidas por López [6], Quispe [7], Parves [8] y Suárez et al [9]. se realiza el cálculo de variables probabilísticas aplicando el método de Gumbel para obtener las precipitaciones diarias máximas probables y las intensidades de lluvia para distintos periodos de retorno.

La expresión matemática de las curvas de intensidad duración y frecuencia es

$$I = \frac{K * T^m}{t^n} \quad (3)$$

Dónde, I es la intensidad de precipitación expresada en mm/hr, T representa el Periodo de Retorno expresado en años y t es el tiempo de duración de precipitación en minutos y K, m, n son parámetros de ajustes

Para poder calcular el valor de cada parámetro de ajuste primero realizamos un cambio de variable donde:

$$d = K * T^m \quad (4)$$

La ecuación 3 queda expresada de la siguiente forma:

$$I = d * t^{-n} \quad (5)$$

Mediante regresiones lineales obtenemos el valor de n para cada periodo de retorno, posteriormente en función del cambio de variable realizado, se hace otra regresión de potencia entre el periodo de retorno y la constante de regresión d para poder obtener valores de la ecuación 4

Finalmente se desarrolla la ecuación de las curvas IDF para el área de estudio según el tiempo de retorno requerido quedando expresada en la siguiente ecuación:

$$I = \frac{1509,8612 * T^{0,181820}}{t^{0,61885}} \quad (6)$$

Donde: I es la intensidad de precipitación expresada en mm/hr,

T representa el Periodo de Retorno expresado en años

t es el tiempo de duración de precipitación en minutos.

Las curvas IDF para las cuencas de estudio y diferentes periodos de retornos se muestra en la figura 3.

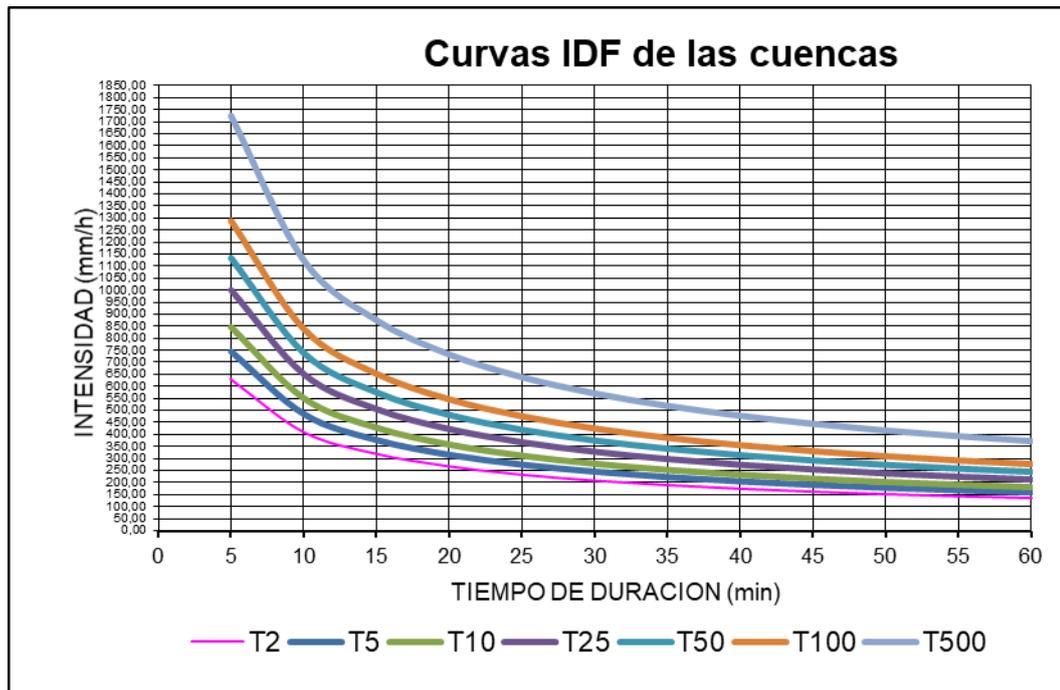


Figura 3: Curvas IDF para las cuencas de estudio

El área, longitud y pendiente de cada una de las cuencas drenantes, fue obtenido mediante la aplicación de herramientas proporcionadas en el software ArcMap en su versión 10.4.

2.3. EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE LAS ESTRUCTURAS DE DRENAJE

La capacidad hidráulica de cada una de las estructuras de drenaje objeto de estudio fue evaluada mediante el software HY-8 en su versión 7.7, desarrollado por el "U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration", permitiendo automatizar los cálculos hidráulicos y determinar las profundidades del flujo de agua tanto al ingreso como a la salida, así como el perfil de flujo en el cuerpo de la alcantarilla [10]. Como resultado del estudio se consideraron alcantarillas con control a la entrada, y el caudal aportante se obtuvo según lo detallado en la sección 2.2.

2.4. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Para determinar el nivel de vulnerabilidad de las estructuras de drenaje se emplearán las curvas de desempeño hidráulico, que relacionan el caudal con la altura del flujo a la entrada de la alcantarilla. Con base en las recomendaciones de Vargas & Garro [11] en la que definen cuatro zonas de operación tal como se expresa en la figura 4 donde en las zonas 1 y 2 la alcantarilla funciona como un canal abierto en operación normal y al límite de operación normal, respectivamente, la zona 3 implica la acumulación de fluido a la entrada de la alcantarilla y su funcionamiento como tubería a presión, por lo que se considera inadecuada y potencialmente peligrosa para el terraplén mientras que la zona 4 representa la probabilidad de inundación de la vía y comprometería la integridad de la estructura de vial.

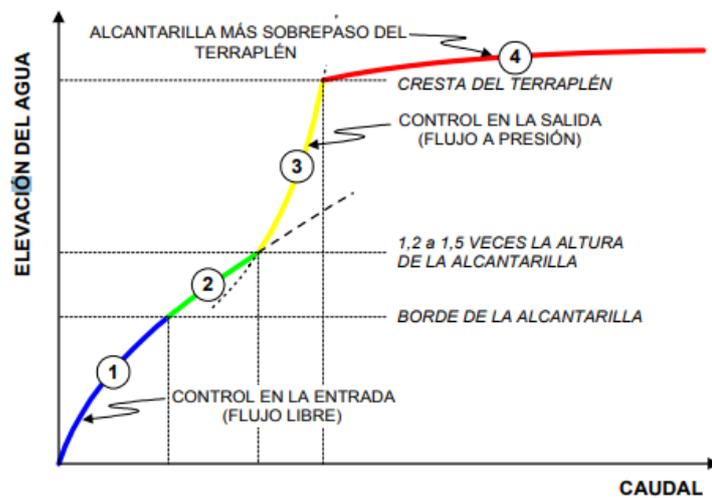


Figura 4: Curvas de desempeño hidráulico de una alcantarilla - Vargas & Garro [10]

En la tabla 3 se expresa el criterio con el que se evaluarán las diferentes estructuras de drenaje en relación con el rango de operación según las curvas de desempeño.

Tabla 3: Niveles de vulnerabilidad según curvas de desempeño

Vulnerabilidad	Zona de Curva	Comentario	Color
Baja	1	Funcionamiento normal	Azul
Moderada	2	Límite de operación normal	Amarillo
Alta	3	Inadecuada, potencialmente peligrosa	Naranja
Muy alta	4	Inundación y daños a la estructura vial	Rojo

Adicional se debe considerar que el nivel de mantenimiento realizado a las estructuras de drenaje influye directamente en la capacidad de evacuar la demanda hidráulica. En el presente caso de estudio las alcantarillas se encontraban limpias y libres de azolvamiento y vegetación que impida el normal flujo del agua.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las principales características de las cuencas se describen en la tabla 4, y se puede identificar que son cuencas pequeñas con superficies que varían desde 0,019 a 0,033 km², con longitud de cauces desde 276 a 400 metros y pendientes pronunciadas entre 13,5% al 24,2% propiciando que los tiempos de concentración sean muy cortos variando entre 0,043 y 0,071 horas.

Tabla 4: Características de las cuencas aportantes

Cuenca	Área (km ²)	Longitud (m)	Pendiente S (m/m)	Tc (horas)
1	0,019	400	0,135	0,071
2	0,023	285	0,172	0,050
3	0,033	276	0,239	0,043
4	0,020	335	0,242	0,049

En función de que las cuencas están caracterizadas como áreas de cultivo con pendientes superiores a 7%, los coeficientes de escorrentía según Chow [4] para periodos de retorno de 10 años es de 0,44; para 25 años es 0,48; para 50 años es 0,51; 100 años 0,54 y finalmente para un periodo de retorno de 500 años es de 0,61.

La tabla 5 representa los caudales calculados mediante la metodología empleada

Tabla 5: Caudales aportantes (m3/seg.)

Cuenca	10 años	25 años	50 años	100 años	500 años
1	2,18	2,81	3,39	4,07	6,15
2	3,29	4,23	5,10	6,13	9,28
3	5,18	6,67	8,04	9,66	14,62
4	2,87	3,70	4,46	5,35	8,10

3.1. RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE LA ALCANTARILLA NRO. 1

Los resultados de la evaluación de la alcantarilla Nro. 1 cuyo material es hormigón y diámetro de 1200mm ubicada en el km 30+220 ante los caudales generados para los periodos de retorno antes mencionados se expresan en la tabla 6 y figuras 6-7.

Tabla 6: Evaluación de alcantarilla Nro. 1

PERIODOS DE RETORNO	CAUDAL EVALUADO (m3/seg)	CAPACIDAD DE DESCARGA (m3/seg)	ELEVACIÓN (m)	PROFUNDIDAD DE CONTROL DE ENTRADA (m)	PROFUNDIDAD DE CONTROL DE SALIDA (m)	VELOCIDAD DE SALIDA (m/s)
PR 10 AÑOS	2,18	2,18	101,29	1,29	0,94	3,48
PR 25 AÑOS	2,81	2,81	101,60	1,60	1,40	3,74
PR 50 AÑOS	3,39	3,39	101,96	1,96	1,69	3,96
PR 100 AÑOS	4,07	4,07	102,47	2,47	2,08	4,24
PR 500 AÑOS	6,15	5,20	103,55	3,55~	2,82	4,67

3.2. RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE LA ALCANTARILLA NRO. 2

El comportamiento de la alcantarilla Nro. 2 ubicada en el km 30+410 se presenta en la tabla 7 y figuras 6-7. La alcantarilla es metálica con un diámetro de 1800mm.

Tabla 7: Evaluación de alcantarilla Nro. 2

PERIODOS DE RETORNO	CAUDAL EVALUADO (m3/seg)	CAPACIDAD DE DESCARGA (m3/seg)	ELEVACIÓN (m)	PROFUNDIDAD DE CONTROL DE ENTRADA (m)	PROFUNDIDAD DE CONTROL DE SALIDA (m)	VELOCIDAD DE SALIDA (m/s)
PR 10 AÑOS	3,29	3,29	82,38	1,38	0,85	2,81
PR 25 AÑOS	4,23	4,23	82,63	1,63	1,12	2,99
PR 50 AÑOS	5,10	5,10	82,88	1,88	1,38	3,12
PR 100 AÑOS	6,13	6,13	83,27	2,19	2,27	3,30
PR 500 AÑOS	9,28	9,28	84,47	3,47~	3,07	4,09

3.3. RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE LA ALCANTARILLA NRO. 3

En la tabla 8 y figuras 6-7 se evidencia el comportamiento de la alcantarilla Nro. 3 cuyo material es hormigón y diámetro de 1500 mm, ubicada en el km 31+200, la cual ante los caudales evaluados presenta los siguientes resultados:

Tabla 8: Evaluación de alcantarilla Nro. 3

PERIODOS DE RETORNO	CAUDAL EVALUADO (m3/seg)	CAPACIDAD DE DESCARGA (m3/seg)	ELEVACIÓN (m)	PROFUNDIDAD DE CONTROL DE ENTRADA (m)	PROFUNDIDAD DE CONTROL DE SALIDA (m)	VELOCIDAD DE SALIDA (m/s)
PR 10 AÑOS	5,18	5,18	99,11	2,11	1,78	4,49
PR 25 AÑOS	6,67	6,67	99,84	2,84	2,33	4,88
PR 50 AÑOS	8,04	7,05	100,05	3,05	2,49	4,99
PR 100 AÑOS	9,66	7,12	100,1	3,1	2,52	5,01
PR 500 AÑOS	14,62	7,29	100,2	3,2	2,59	5,06

ALCANTARILLA 3 EVALUACIÓN PARA UN PR 25 AÑOS

CAUDAL DE EVALUACIÓN 6,67 m³/seg.

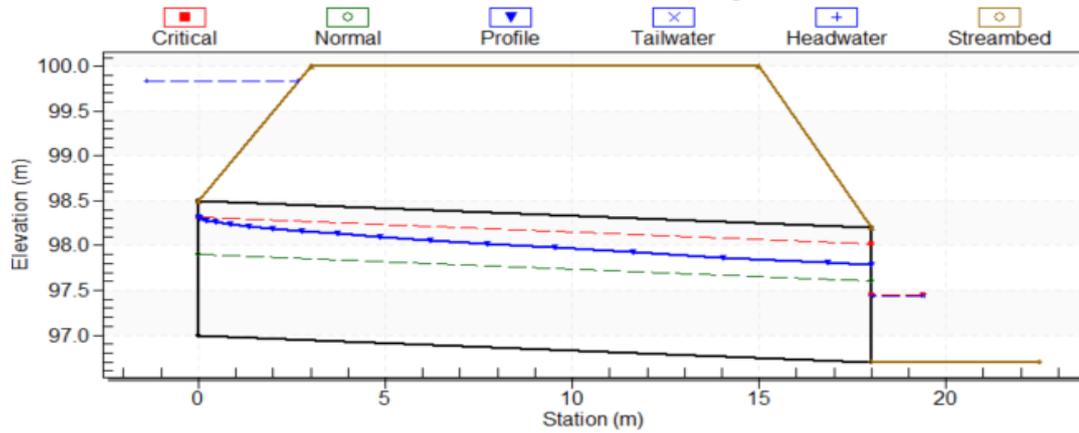


Figura 5: Comportamiento de la alcantarilla Nro. 3 para un caudal generado para un PR 25 años

3.4. RESULTADOS DE EVALUACIÓN DE LA ALCANTARILLA NRO. 4

En el kilómetro 31+420 se ubica una estructura de drenaje que está conformada por dos alcantarillas de hormigón ubicadas en paralelo de diámetro 1000 mm cada una y cuyo comportamiento ante los caudales generados por los periodos de retorno evaluados se presentan en la tabla 9 y figura 6-7.

Tabla 9: Evaluación de alcantarilla Nro. 4

PERIODOS DE RETORNO	CAUDAL EVALUADO (m ³ /seg)	CAPACIDAD DE DESCARGA (m ³ /seg)	ELEVACIÓN (m)	PROFUNDIDAD DE CONTROL DE ENTRADA (m)	PROFUNDIDAD DE CONTROL DE SALIDA (m)	VELOCIDAD DE SALIDA (m/s)
PR 10 AÑOS	2,87	2,87	94,1	1,1	0,71	3,41
PR 25 AÑOS	3,7	3,7	94,39	1,39	1,13	3,64
PR 50 AÑOS	4,46	4,46	94,71	1,71	1,4	3,83
PR 100 AÑOS	5,35	5,35	95,17	2,17	1,77	4,06
PR 500 AÑOS	8,1	5,7	95,37	2,37	1,93	4,14

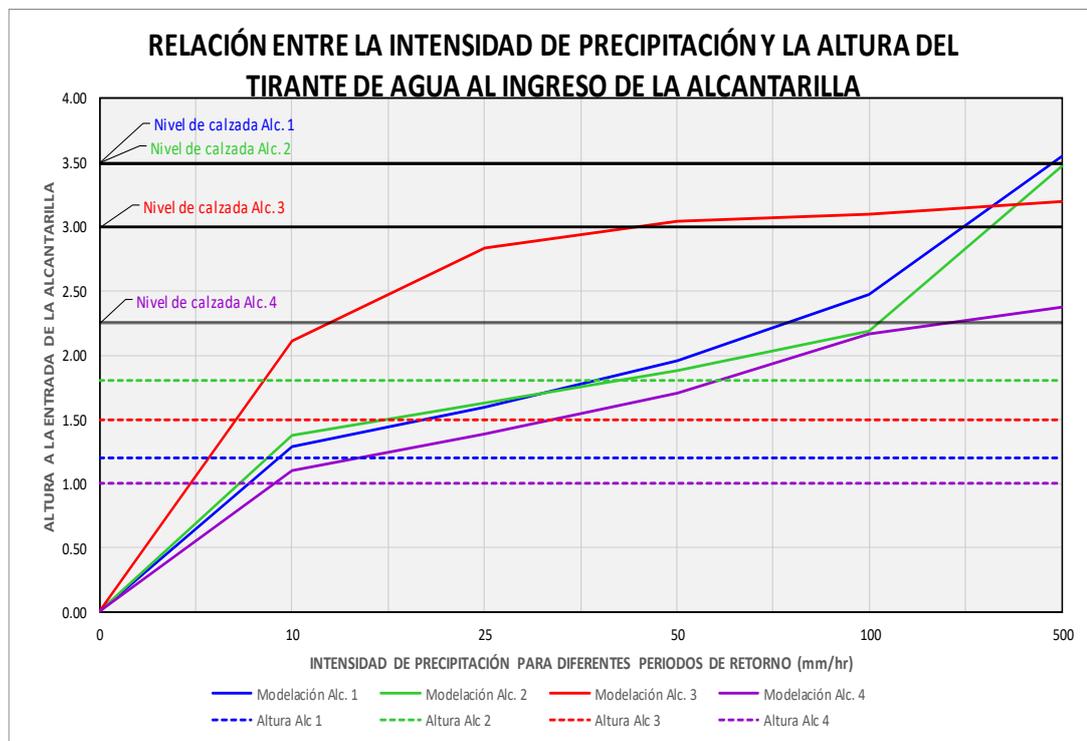


Figura 6: Relación entre la intensidad de precipitación y la altura del tirante de agua al ingreso de la alcantarilla

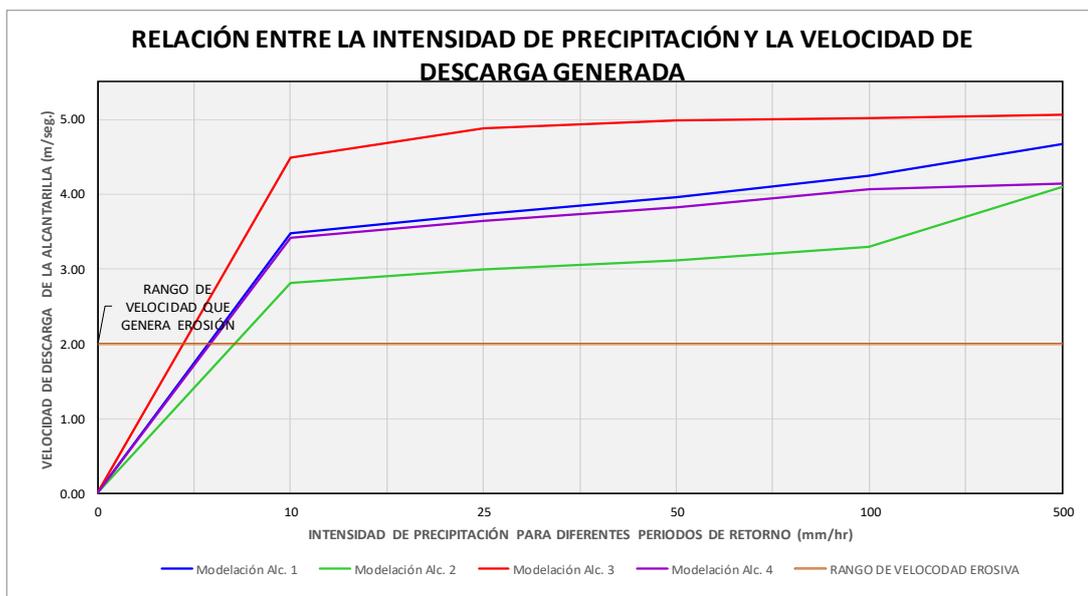


Figura 7: Relación entre la intensidad de precipitación y la velocidad de descarga generada a la salida.

La evaluación de las estructuras de drenaje para un periodo de retorno de 10 y 25 años permitió constatar que únicamente la alcantarilla Nro. 2 de diámetro 1800mm tiene la capacidad de evacuar el caudal generado trabajando a un 76 y 90% de capacidad, mientras que las restantes lo hacían estando sumergidas a la entrada, adicionalmente al ser canales no revestidos todas las alcantarillas generaban una velocidad de salida erosiva.

Para un periodo de retorno de 50 años, las alcantarilla Nro. 1, 2 y 4 trabajan estando sumergidas a la entrada, mientras la alcantarilla Nro. 3 no tiene la capacidad de evacuar el caudal generado a tal punto que presenta desbordamiento sobre la calzada.

Mientras que, para un periodo de retorno de 100 años, la alcantarilla Nro. 4 está próxima al desbordamiento, y finalmente ante un evento meteorológico más extremo donde se considere una lluvia con periodo de retorno de 500 años, todas las alcantarillas no estarían en capacidad de evacuar el caudal generado, presentando el desbordamiento sobre la calzada; lo que comprometería enormemente la integridad de la estructura vial.

3.5. NIVEL DE VULNERABILIDAD

En base al criterio planteado en la sección 2.4 y a los resultados obtenidos al evaluar el funcionamiento hidráulico de cada una de las alcantarillas para diferentes periodos de retorno que simulan condiciones meteorológicas extremas, en la tabla 10 se expresan los niveles de vulnerabilidad para cada caso

Tabla 10: Resultado de la evaluación de vulnerabilidad de las alcantarillas.

Alcantarilla	PR 10 años	PR 25 años	PR 50 años	PR 100 años	PR 500 años
1	Moderada	Moderada	Alta	Alta	Muy Alta
2	Baja	Baja	Moderada	Moderada	Muy Alta
3	Moderada	Alta	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
4	Moderada	Moderada	Alta	Alta	Muy Alta

4. CONCLUSIONES

Se evaluaron 4 alcantarillas ubicadas en la vía que une los cantones Portoviejo y Pichincha en la provincia de Manabí, considerando las características de cada una y un caudal de crecida con periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 500 años obteniendo que ante eventos de lluvias extremas los sitios evaluados son bastante vulnerables, lo que conllevaría al desbordamiento del agua por sobre la calzada, generando velocidades erosivas, lo cual comprometerá la integridad de la estructura vial.

De todas las alcantarillas evaluadas, la nro. 3 tiene la mayor vulnerabilidad ante los eventos meteorológicos que se puedan presentar.

Basado en que la normativa ecuatoriana considera que las estructuras de drenaje transversal deben ser diseñadas para un periodo de retorno de 25 años, se sugiere rediseñar las alcantarillas 1, 3 y 4 ya que ante el caudal evaluado trabajaban sumergidas a la entrada.

Adicionalmente se deben considerar acciones de protección que reduzcan los efectos erosivos de las velocidades de diseño, así como el mantenimiento preventivo que evite la acumulación de desechos sólidos y el desbordamiento de las alcantarillas.

1. PIAR, Marco Internacional para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático" Taller, La Habana, 2017
2. Ospina, E. J. C. (2021). Levantamientos topográficos mediante el uso de drones topographic uprising through the use of drones. *INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 8(2), 100-113.
3. Briceño-Briceño, E., Oñate-Valdivieso, F., & Oñate-Paladines, A. (2021). Evaluación de la capacidad de transporte de caudales y sedimentos del drenaje transversal en una carretera montañosa en los Andes del Ecuador. *Avances Investigación en Ingeniería*, 18(1).
4. Chow, V.T., Maidment, D. y Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGrawHill.
5. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Anuarios Meteorológicos 1990 al 2012, Quito, Ecuador, [en línea]. Disponible: <https://www.inamhi.gob.ec/biblioteca/>
6. López Rodríguez, J. J., Delgado, O., & Campo, M. Á. (2018). Determinación de las curvas IDF en Igueldo-San Sebastián. Comparación de diferentes métodos. *Ingeniería del agua*, 22(4), 209-223.
7. Quispe Mamani, J. C. (2018). Curvas IDF para la estación meteorológica de Viacha, departamento de La Paz. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, 5(1), 99-105
8. Parvez, M. B., & Inayathulla, M. (2019). Assesment of the intensity duration frequency curves for storms in upper Cauvery Karnataka based on pearson Type III extreme value. *World Academics Journal of Engineering Sciences*, 6(1), 26-46
9. Suárez-Aguilar, ZE, Sepúlveda-Delgado, O., Patarroyo-Mesa, M., & Canaria-Camargo, LC (2020). Modelo matemático para estimar curvas de intensidad, duración y frecuencia de lluvias extremas en Tunja, Colombia. *Información tecnológica*, 31 (1), 193-206
10. Adeogun, A. G., Akinpelu, M. A., Yusuf, M. A., & Animashaun, R. A. (2019). Evaluation of HY-8 Modeling Tool for Hydraulic Analysis of Selected Culverts along Ilorin-Jebba Road, Kwara State, Nigeria. *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, 15(1), 133-141
11. Vargas, W., & Garro, J. (2008). Relación entre las características geométricas y la vulnerabilidad de algunas rutas de montaña de Costa Rica. In *I Congreso Ibero-Americano de Seguridad Vial (I CISEV)*. Costa Rica.