

Propiedades físico- mecánicas e hidráulicas de los pavimentos ecuatorianos
Vladimir Pazmiño; Alfonso Arellano; Cristina Polo; Michelle Bonilla

Universidad Nacional de Chimborazo, [https://orcid: 0000-0002-7169-7648](https://orcid.org/0000-0002-7169-7648)
Universidad Nacional de Chimborazo, <https://orcid.org/0000-0001-7369-0071>
Universidad Nacional de Chimborazo, [https://orcid: 0009-0001-9631-7146](https://orcid.org/0009-0001-9631-7146)
Universidad Nacional de Chimborazo, <https://orcid.org/0000-0002-3247-8995>

Palabras claves: pavimentos, escorrentía, permeabilidad

Problema

En la actualidad se observan eventos hidrológicos extra ordinarios relacionados al cambio de las condiciones climáticas, que sobrepasan las capacidades del drenaje vial y afectan la seguridad en las vías además de que producen aluviones que destruyen la infraestructura vial, sanitaria y urbanística. La acumulación de agua sobre la calzada reduce la fricción generada al contacto con el neumático pudiendo derivar en fenómenos como el hidropneumático. Debido al crecimiento urbanístico, la cantidad de agua que usualmente se infiltraba en el subsuelo ha disminuido y es desviada de su destino original, ya que escurre por las superficies encementadas y pavimentadas reduciendo la recarga de los acuíferos y aumentando el potencial destructivo de aluviones urbanos. Los tipos de pavimentos más usados en Ecuador son los tres siguientes. 1) Pavimento rígido es una losa de concreto hidráulico, que se encuentra sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado a la que se le denomina subbase. La losa distribuye las cargas sobre el área del suelo. 2) Pavimento flexible es una capa conformada por una mezcla asfáltica o bituminosa (capa de rodadura) que absorbe los esfuerzos horizontales y parte de los verticales. Los semi-rígidos tienen la misma estructura de los flexibles pero se rigidiza una de sus capas con un aditivo que puede ser: asfalto, emulsión, cal, cemento y químicos con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del pavimento. 3) Pavimentos articulados tienen su capa de rodadura compuesta por bloques de concreto simple prefabricados, llamados adoquines. La subrasante puede ser mejorada con una capa de arena o una de base granular (Zárate Juan, 2019).

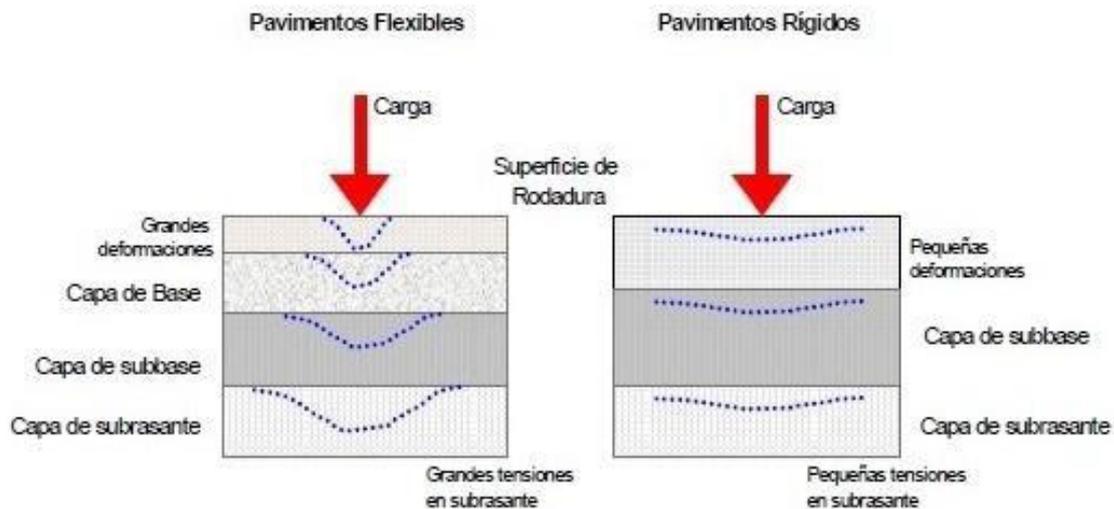


Figura 1. Estructura de los pavimentos flexibles y rígidos Fuente: (Zárate Juan, 2019)

La subrasante podrá ser considerada como la cimentación del pavimento. La sub-base soporta, trasmite y distribuye con uniformidad las cargas aplicadas a la capa de rodadura. Está constituida por material granular y está sobre la sub-rasante. La base se encuentra sobre la sub-base y puede estar compuesta por material granular así como por otros materiales: cal, cemento o materiales bituminosos (llamada base estabilizada). La base y la sub-base permiten el drenaje. La capa de rodadura es la capa superior y se encuentra sobre la base. El pavimento está conformado por capas superpuestas sobre la rasante del suelo, después de que se ha realizado el movimiento de tierras para lograr un suelo que resista los esfuerzos que producen las cargas del tránsito durante el período de diseño seleccionado (Zárate Juan, 2019).

Los pavimentos rígidos, flexibles, semi-rígidos, articulados y empedrados son construidos con pendientes transversales que permiten que la precipitación escurra hacia las cunetas que son construidas a los costados de la vía. Esas cunetas conducen el agua hacia quebradas o hacia colectores que cruzan debajo de las vías para descargar en quebradas (Castope, 2017). Este proceso se ve frecuentemente afectado por los escombros, basura o por obras de arte que obstaculizan las cunetas de manera que durante las precipitaciones el agua sale de su cauce y encharca las vías ocasionando derrapes de los vehículos que afectan el nivel de seguridad del conductor y encharcamientos que destruyen la capa de rodadura con baches que afectan la comodidad del usuario (Barbudo, 2015).

El agua que escurre en las calzadas está relacionada a las características físico-mecánicas e hidráulicas del pavimento vial. Estas características no han sido evaluadas ni correlacionadas entre sí de manera que se desconocen las magnitudes y los mecanismos de esas interrelaciones, razón por la cual es el primer objetivo de esta investigación.

Si se tuviesen superficies menos impermeables se disminuiría el caudal que escurre a las cunetas y sumideros y aumentaría el de infiltración que aportaría a la recarga de acuíferos dependiendo de algunas variables que se sustentan directamente en conocimientos de: hidrología, suelos, geología, geomorfología, materiales y técnicas de construcción e hidráulica básicamente. No se debe dejar de lado el factor demográfico que para algunos autores es el detonante debido a la rápida urbanización que reemplazó la vegetación natural por superficies pavimentadas utilizadas como vías, estacionamientos, terrazas y cubiertas de edificaciones (Eshtawi et al., 2016; Hoeppe, 2016; Owuor et al., 2016; Sambito et al., 2021).

El diseño del alcantarillado pluvial en el Ecuador se basa en las Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes (INEN, 1992) . El caudal de escurrimiento superficial directo se basa en el método racional y la norma ecuatoriana lo recomienda en cuencas tributarias menores a 100 hectáreas:

$$Q=0,00279cIA \quad \text{(Ecuación 1)}$$

En donde:

Q = caudal de escurrimiento en m³/s;

C = coeficiente de escurrimiento (adimensional);

I = intensidad de lluvia para una duración de lluvias, igual al tiempo de concentración de la cuenca en estudio, en mm/h;

A = Área de la cuenca, en hectáreas

El caudal pico de esorrentía superficial se puede determinar utilizando el método racional como procedimiento hidrológico para áreas urbanas menores de ochenta hectáreas tomando en cuenta un coeficiente de esorrentía constante durante la tormenta de diseño, y considerando que toda el área de drenaje contribuye al flujo de una manera uniforme (Cisneros & Alberto, 2022).

El coeficiente de escurrimiento es la fracción de agua que resbala o escurre en una superficie. La fracción que no escurre podría infiltrarse o ser retenida en la superficie (Pérez López, 2015). Si es que la mayoría de superficies en un centro poblado tienen un coeficiente de escurrimiento alto significaría que una fracción muy baja se infiltraría lo que disminuiría los procesos de recarga de los acuíferos subterráneos (Domínguez Pérez, 2018). El agua retenida en la superficie aumentaría el volumen de agua evaporada mientras que el volumen de agua escurrida se dirige a cunetas y colectores pluviales (Abanto Plasencia, 2017).

Las normas ecuatorianas para el diseño y construcción de obras viales y de alcantarillado pluvial están desactualizadas y los datos referenciales no se ajustan a los materiales ni a las técnicas constructivas actuales.

Coeficientes de escurrimiento de superficies

No	Tipo de superficie	Coeficiente de escurrimiento "C"
1	Cubierta metálica o teja vidriada	0,95
2	Cubierta con teja ordinaria o impermeabilizada	0,9
3	Pavimentos asfálticos en buenas condiciones	0,85 – 0,9
4	Pavimentos de hormigón	0,8 – 0,85
5	Empedrados (juntas pequeñas)	0,75 – 0,8
6	Empedrados (juntas ordinarias)	0,4 – 0,5
7	Pavimentos de Macadam	0,25 - 0,6
8	Superficies no pavimentadas	0,1 – 0,3
9	Parques y jardines	0,05 – 0,25

Fuente: Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes, Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN, Quito, (INEN, 1992)

El coeficiente de escurrimiento "C" de la norma ecuatoriana, que permite calcular el caudal pluvial que ingresa al Sistema de alcantarillado a través de sumideros en las calzadas, debe ser revisado y actualizado porque de eso depende el caudal de diseño hidráulico. Por lo expuesto, el Segundo objetivo de esta investigación es determinar el coeficiente de escurrimiento de varios tipos de calzadas y compararlos con los vigentes en la normativa ecuatoriana.

Los métodos y las técnicas disponibles actualmente para determinar las características físicas y mecánicas de suelos, materiales de construcción y pavimentos son una combinación de técnicas tradicionales de las que se obtienen muestras para analizarlas en un laboratorio principalmente; y, técnicas modernas a través de equipos electrónicos como el geogauge y densímetro eléctrico para trabajar in situ. Existe una variedad de ellas que deben seguir un orden sistemático en un proceso de obtención de información y de interpretación inmediato para definir la siguiente técnica a usar y variable a determinar. Estos procesos de laboratorio y de campo deben ser bien definidos para replicarlos en las muestras a analizar de manera que los resultados sean comparables y permitan obtener patrones con significancia estadística que conduzcan a resultados sustentables. Por lo expuesto, el tercer objetivo de esta investigación es elaborar las guías de laboratorio para las pruebas de materiales de construcción, de suelos y de pavimentos que se usan en esta investigación.

Justificación

El conocimiento de las características físico-mecánicas e hidráulicas de los pavimentos de las principales vías de la Región 3 del Ecuador permitirían definir el diseño de un nuevo tipo de "pavimento poroso" que permita más infiltración (Arce Quintana, 2019) y disminuya el escurrimiento para que reduzca la energía cinética de

los flujos pluviales y mitigue el impacto de los aluviones, reduzca la inseguridad del conductor cuando el pavimento está mojado y que además permita la recarga los acuíferos. Los diseños serán evaluados en prototipos para determinar sus características finales.

Metodología

Tipos de pruebas

Para determinar estas características es necesario establecer las metodologías aplicadas a nuestro medio, para las pruebas de campo y las de laboratorio. En las pruebas de campo se usarán equipos eléctricos (geogauge y densímetro). Para los ensayos de laboratorio se definen los ensayos extractivos para valorar resistencias de las capas del pavimento con procedimientos no destructivos y de bajo costo, utilizando los equipos existentes en el Laboratorio de Materiales de Ingeniería Civil de la UNACH.

Para determinar la infiltración del agua en un pavimento y el escurrimiento sobre la capa de rodadura se aplica el método del infiltrómetro de doble Anillo con las características reportadas por (Cepeda et al., 2024) (Figura 2). (Chen et al., 2020) midió la permeabilidad de los pavimentos a través de pruebas hidráulicas con cargas variables y constantes, a través de marcos cuadrados colocados sobre los pavimentos permeables.

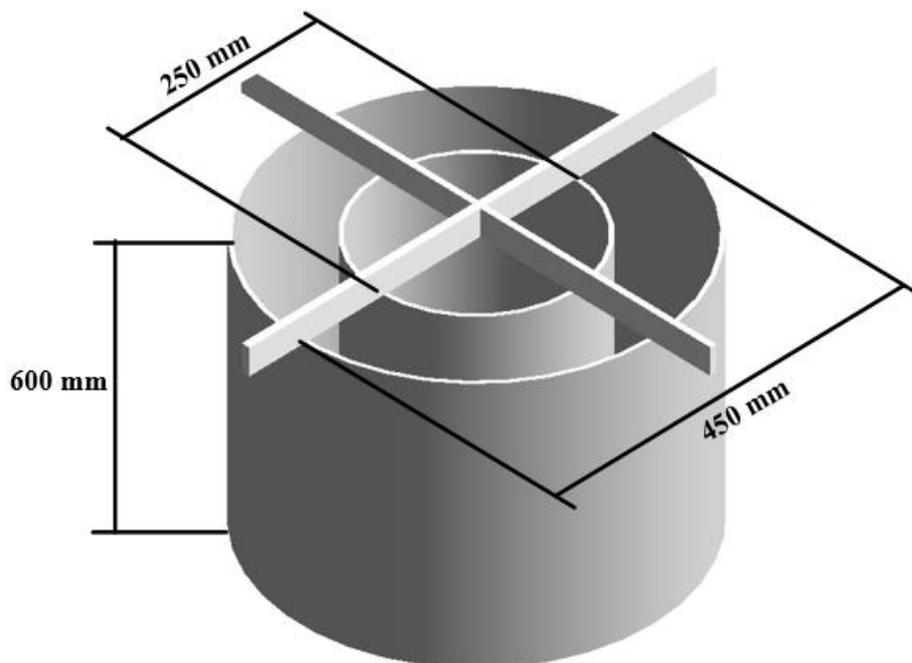


Figura 2. Esquema infiltrómetro de doble anillo. Fuente : Cepeda y Rosero 2024

Se llena de agua el cilindro externo para provocar una presión hidráulica que impida la fuga del agua proveniente del cilindro interno. Se impermeabiliza la base del cilindro con cauchos (burletes alambrados 341) que se insertan en la base externa del cilindro y se le añade un refuerzo de silicón una vez que se ha colocado 15 kg de peso

en cada lado de la cruz superior de manera que los 60 kg los presione contra el pavimento para que impidan la salida del agua. El volumen total previamente determinado, disminuye debido a que se infiltra dentro del pavimento. La diferencia entre el volumen total y el infiltrado corresponde al volumen escurrido, que expresado en porcentaje, con respecto al total del volumen se llama coeficiente de escurrimiento ("C"). Mientras se ejecuta esta prueba de campo, se la debe proteger con un paraguas para impedir que se añada más agua de la determinada en casos de lluvia y también para impedir que se evapore el agua cuando sea un día soleado.

Figura 1. *Perfiles burlletes alambrados 341. Esquema adaptado de GLOBAL RUBBER CORPORATION S.A.C.Fuente: (Cepeda et al., 2024)*



Figura 2. *Vista lateral caucho.*



Figura 3. *Vista superior del caucho, se observa el alma metálica.*

Muestras.

Se selecciona aleatoriamente tramos de vías de primero, segundo y tercer orden localizados en Cantones de las Provincias de Chimborazo y Tungurahua, de manera que se obtengan datos de Pavimentos Rígidos, Flexibles y Articulados, que son frecuentes en la región.

Técnicas para pruebas de laboratorio y de campo

Las técnicas definidas en la Tabla 1, son agrupadas de acuerdo al resultado esperado y para una mejor comprensión se las resume en la Figura 2.

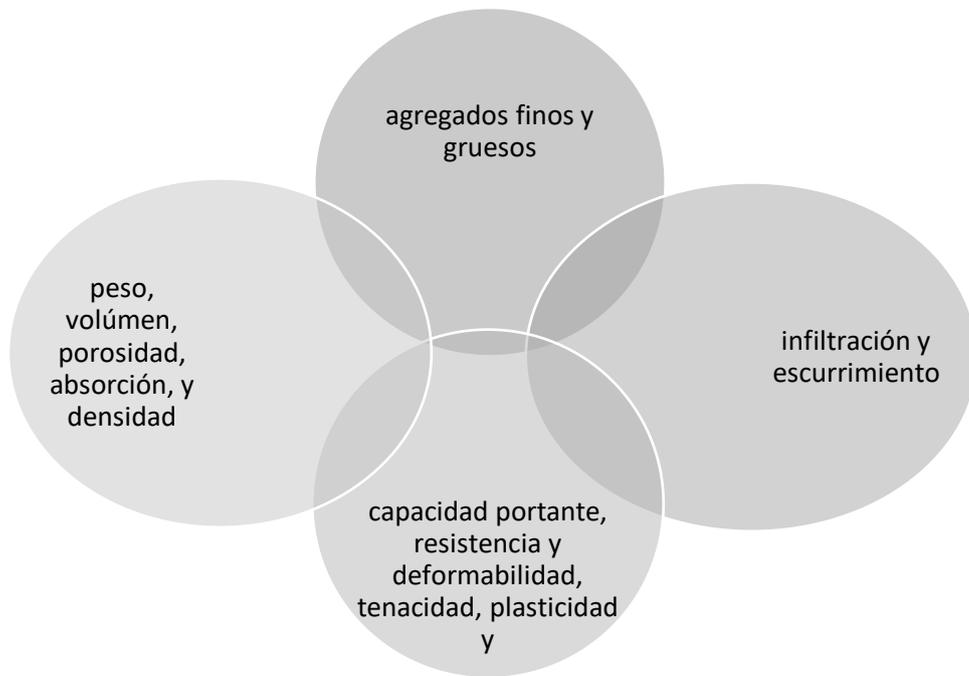


Figura 2. Principales características de los pavimentos interrelacionadas

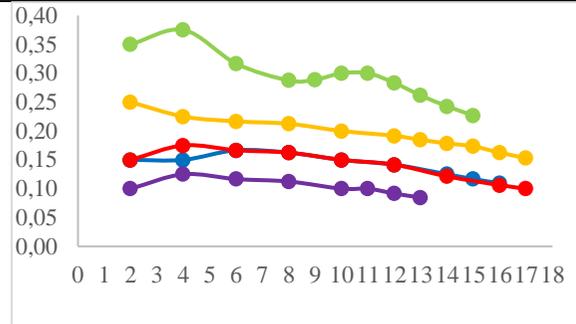
Resultados

Hasta el mes de octubre del 2024 se ha estudiado 11 vías localizadas en la Provincia de Chimborazo. Se espera estudiar 10 vías más que corresponden a las Provincias de Tungurahua, Bolívar y Morona Santiago. También se están realizando 3 Guías de Laboratorio de Materiales de Construcción, de Suelos y de Pavimentos considerando los equipos existentes en el Laboratorio de Materiales de Ingeniería Civil, los problemas frecuentes de los estudiantes durante esos ensayos y las formas de resolverlos con ejemplos asistidos por fotografías y aplicaciones de manera que sea un importante material didáctico.

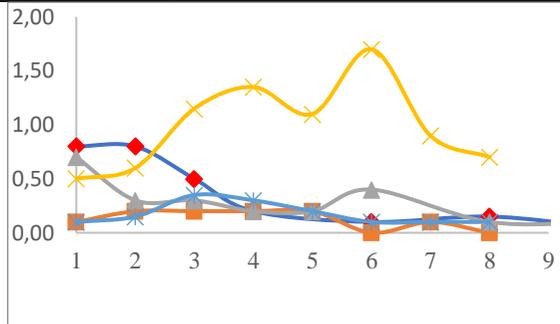
Las vías estudiadas que tienen Pavimentos Rígidos son: 1) Avda. Circunvalación, lado occidental de Riobamba reportado por (Cepeda et al., 2024)); 2) Vía Balbanera-Pallatanga investigado por (Sanipatín & Pazmiño, 2024)); 3) Vía Pallatanga-Cumandá estudiado por (Guayanlema et al., 2024) .

Los Pavimentos flexibles investigados se encuentran en: 4) Vía Flores-Cebadas (Casco et al., 2024); 5) Vía Riobamba-Flores (Aucapiña et al., 2024); 6) Vía Colta-Guamote estudiada por (Castillo et al., 2024). Los pavimentos articulados estudiados se encuentran en: 7) Barrios orientales de Riobamba investigados por Alvear y Piñas (2024); 8) Centro de Guano estudiado por Tierra y Yupangui (2024). En resumen, existe información primaria de 3 pavimentos rígidos, 3 flexibles y 2 articulados.

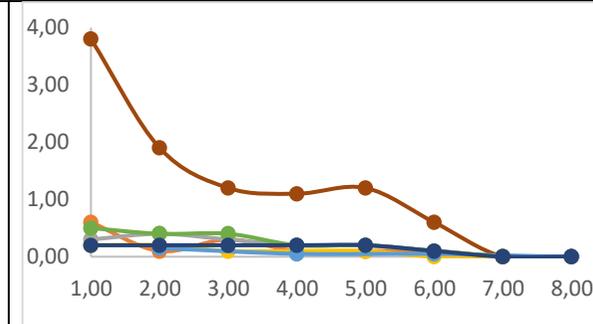
Figura ...Curvas de infiltración: velocidad de infiltración (cm/hora) versus tiempo (hora)



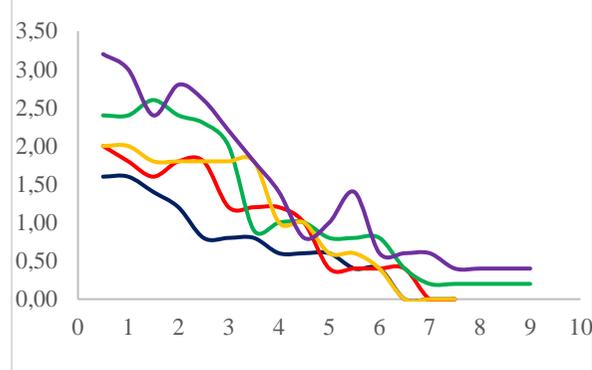
Lado oriental de la Avda de Cicunvalación de Riobamba (Cepeda et al., 2024)



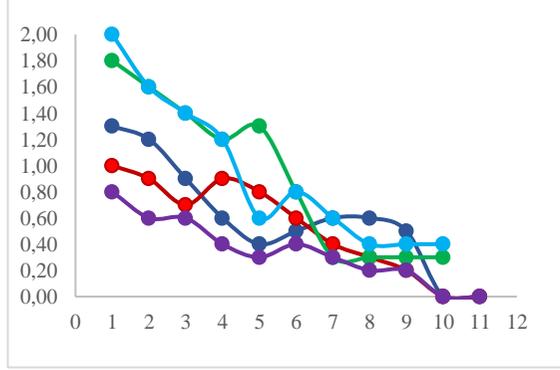
Vía Balbanera-Pallatanga investigado por (Sanipatín & Pazmiño, 2024)



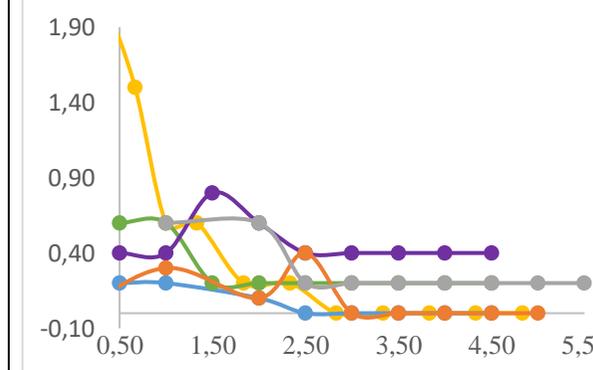
Vía Pallatanga-Cumandá estudiado por (Guayanlema et al., 2024)



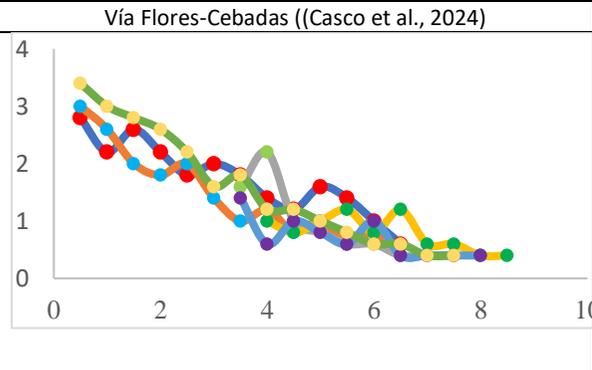
Vía Flores-Cebadas ((Casco et al., 2024)



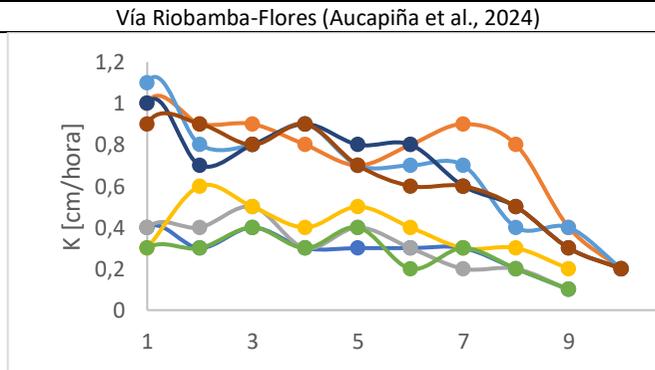
Vía Riobamba-Flores (Aucapiña et al., 2024)



Vía Colta-Guamote ((Castillo et al., 2024)



Alvear y Piñas (2024);



Tierra y Yupangui (2024)

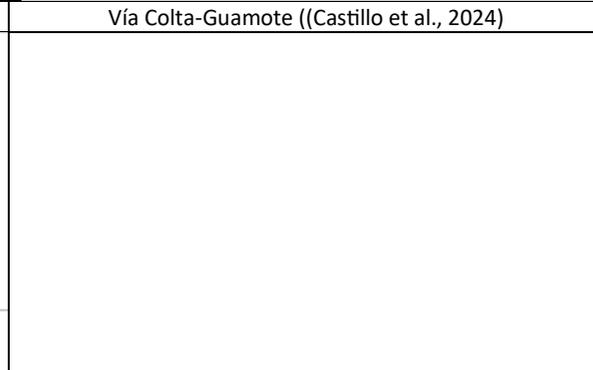
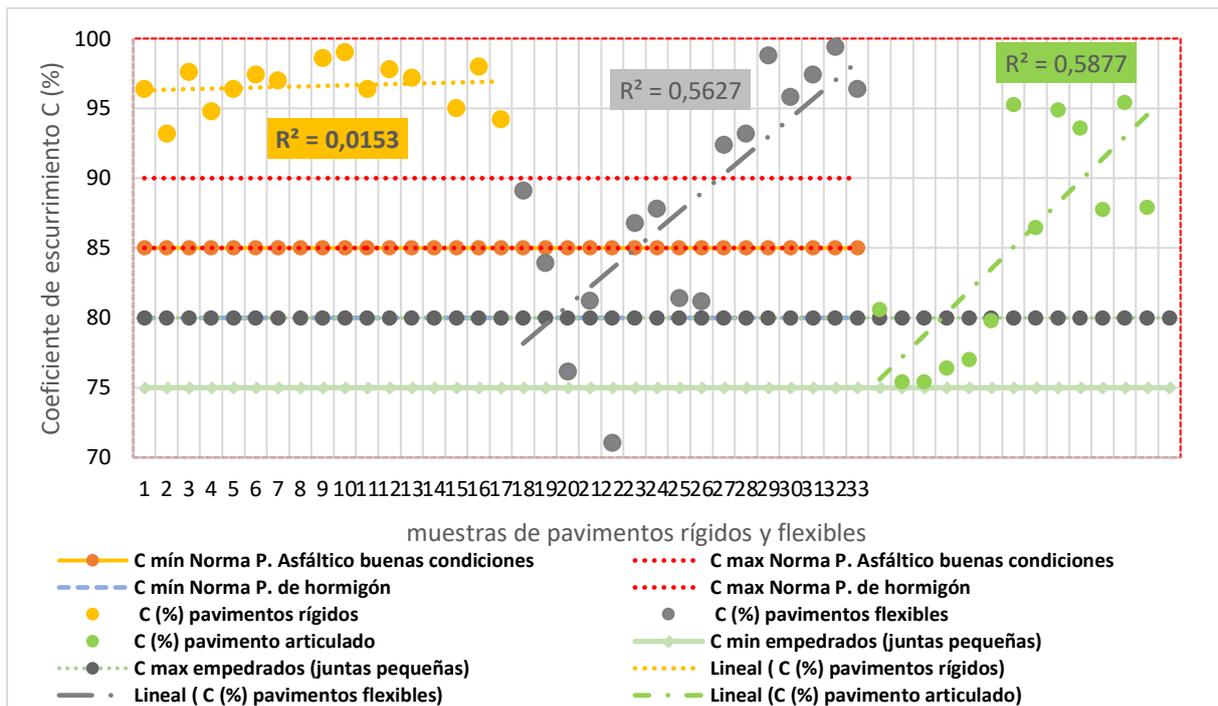


Figura... Coeficientes de escurrimiento "C" comparados con los de la norma ecuatoriana



Los valores del coeficiente de escurrimiento de tres pavimentos rígidos superan los valores máximos, para pavimentos asfálticos en buenas condiciones (90%) y para pavimentos de hormigón (85%), correspondientes a la norma ecuatoriana (INEN 005-9-1, 1992). La descripción de la norma de esos dos tipos de pavimentos no corresponde al tipo de asfalto investigado, pero son los más parecidos. El pavimento de hormigón utiliza cemento y agregados. El Pavimento rígido usa asfalto, cemento y agregados, pero tiene refuerzo de acero también. El pavimento asfáltico usa asfalto y agregados, pero no tiene cemento ni acero de refuerzo. Por lo tanto, solamente se evidencia que los coeficientes de escurrimiento normados deben ser corregidos con materiales y técnicas de construcción actualizados. El coeficiente de determinación ($R^2=0,0153$) indica que no existe una correlación lineal significativa de la muestra. Si es que los pavimentos rígidos construidos fueron diseñados con algunos de los valores normados y mostrados en la figura, significaría que las vías son más impermeables que lo que se esperaba y por lo tanto el agua escurre en mayor cantidad a los drenajes vial.

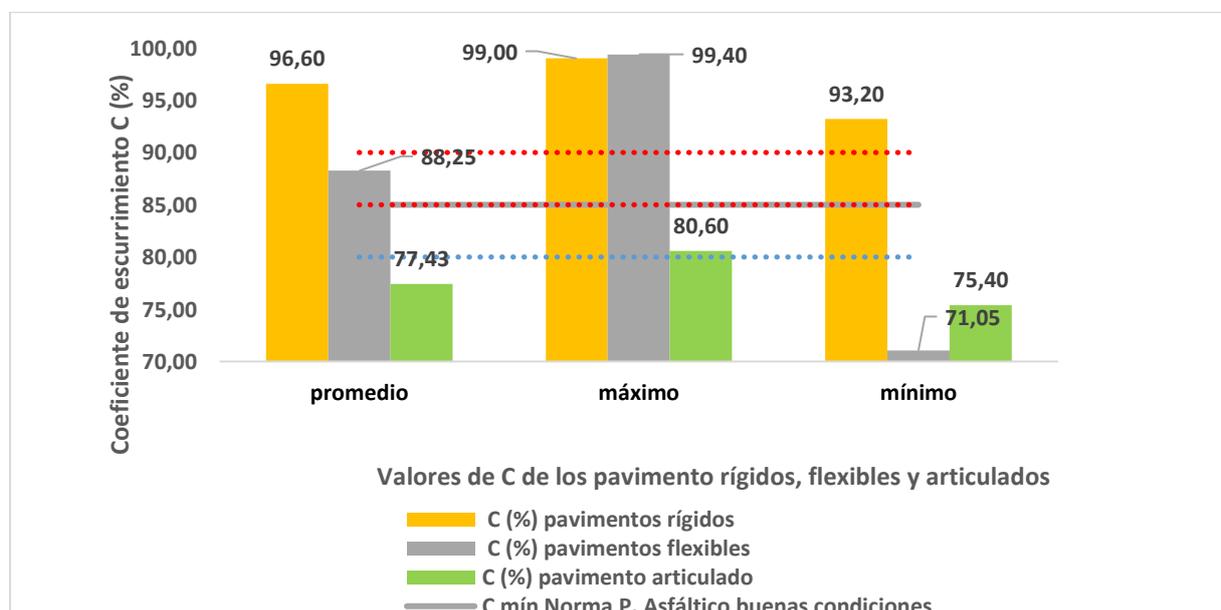
De las 16 muestras de pavimentos flexibles, 2 están debajo del valor mínimo de pavimentos de hormigón (12,5%); 4 se encuentran dentro del rango de ese pavimento (25%); 3 se encuentran dentro del rango de los pavimentos asfálticos en buenas condiciones (18,75%); y, 7 se encuentran sobre el valor máximo de los asfálticos (43,75%). Llama la atención que la tendencia es positiva y su coeficiente de

determinación ($R^2=0,5627$) demuestra que la correlación es fuerte (Hernández Sampieri et al., 2006). Esa tendencia significativa se atribuye a que las 3 vías de pavimentos flexibles tienen edades diferentes, siendo la más antigua la que presenta coeficientes de escurrimiento más bajos que los otros pavimentos flexibles. Por lo tanto, el valor del coeficiente de escurrimiento de los pavimentos flexibles disminuye cuando aumenta la edad del pavimento debido al desgaste de los materiales, Este efecto no se nota en los pavimentos rígidos, que siendo también de edades diferentes, los valores de sus coeficientes no tienen esa tendencia ($R^2=0,0153$).

El 43,75% de las muestras de pavimentos flexibles coinciden con la subestimación del coeficiente de escurrimiento como en el caso de los pavimentos rígidos.

De 14 muestras de pavimento articulado (adoquinado exagonal), 6 (Alevar y Piñas, 2024) corresponden a uno relativamente nuevo localizado en la parte urbana de Riobamba y 8 (Tierra y Yupangui, 2024) corresponden a uno antiguo del área urbana de Guano. Cinco de los 6 antiguos (35,7% del total) tienen valores de "C" comprendidos en el rango de empedrados de juntas pequeñas (nomenclatura usada por la Norma ecuatoriana). Uno de ellos (7,1%) está en el rango de Pavimentos de hormigón. Tres (21,4%) corresponden al rango de pavimentos flexibles y 4 muestras (28,6%) están sobre el valor máximo de pavimentos flexibles. También tienen una tendencia positiva significativa ($R^2=0,5877$) debido a la edad y deterioro del adoquinado.

Los drenajes se diseñan para un caudal que es directamente proporcional a la multiplicación del área de aportación, de la precipitación y del coeficiente de escurrimiento. Por lo tanto, se habría subestimado el caudal de diseño debido a que realmente escurre más agua de esos pavimentos.



Los pavimentos articulados muestran mejores condiciones de drenaje sub superficial que los flexibles y los rígidos, aunque todavía no garantizan la infiltración en la subrasante. Sus valores de escurrimiento se atribuyen a las juntas entre adoquín principalmente, aunque hay que investigar con más detalles las características de densidad, porosidad y absorción de los adoquines, sabiendo que son de fabricación artesanal principalmente.

Conclusiones

Se debe investigar cuáles propiedades físicas y/o mecánicas inciden en la alta impermeabilidad de los pavimentos rígidos y flexibles y se debe analizar más muestras de los dos tipos de pavimentos para confirmar esas tendencias.

Para futuros proyectos viales se debe usar los nuevos coeficientes de escorrentía con la finalidad de no subestimar los caudales de diseño que influyen proporcionalmente en las dimensiones de los drenajes viales, con la finalidad de disminuir el impacto causado por la escorrentía.

- Aucapiña, R., Jiménez, W., & Pazmiño, H. (2024). *Características físicas mecánicas e hidráulicas evaluadas en el pavimento flexible del corredor vial Riobamba-Flores* [Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12905>
- Casco, J., Salcán, V., & Pazmiño, H. (2024). *CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, MECÁNICAS E HIDRÁULICAS EVALUADAS EN EL PAVIMENTO FLEXIBLE DEL CORREDOR VIAL FLORES - CEBADAS* [Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12872>
- Castillo, I., Hidalgo, J., & Pazmiño, H. (2024). *Caracterización física - hidráulica del pavimento flexible en el tramo Colta - Guamote del corredor vial e-35 Riobamba – Cuenca*. [Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12963>
- Cepeda, M., Rosero, R., & Pazmiño, H. (2024). *Evaluación de las características hidráulicas y físicas del pavimento rígido en la Avenida 9 de Octubre ubicada en la ciudad de Riobamba* [Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/12448>
- Chen, L. M., Chen, J. W., Lecher, T., Chen, T. H., & Davidson, P. (2020). Assessment of clogging of permeable pavements by measuring change in permeability. *Science of the Total Environment*, 749. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141352>
- Cisneros, C., & Alberto, M. (2022). *Evaluación del estándar de diseño de rejillas para sumideros viales de aguas lluvias en la ciudad de Quito* [Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/21353>
- Eshtawi, T., Evers, M., & Tischbein, B. (2016). Quantifying the impact of urban area expansion on groundwater recharge and surface runoff. *Hydrological Sciences Journal*, 61(5), 826–843. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.1000916>

- Guayanlema, J., Ruiz, R., & Arellano, A. (2024). *Evaluación de las principales condiciones físicas e hidráulicas del pavimento rígido existente en la vía Pallatanga-Cumandá* [Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/13097>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2006). *Metodología de la investigación* (Cuarta). McGraw-Hill.
- Hoeppe, P. (2016). Trends in weather related disasters - Consequences for insurers and society. *Weather and Climate Extremes*, 11, 70–79. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.10.002>
- INEN, 005-9-1. (1992). NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES. In *Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1 000 habitantes* (Vol. 1). Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. <https://archive.org/details/ec.cpe.5.9.1.1992/page/n43>
- INEN 005-9-1. (1992). NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES. In *Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1 000 habitantes* (Vol. 1). Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. <https://archive.org/details/ec.cpe.5.9.1.1992/page/n43>
- Owuor, S. O., Butterbach-Bahl, K., Guzha, A. C., Rufino, M. C., Pelster, D. E., Díaz-Pinés, E., & Breuer, L. (2016). Groundwater recharge rates and surface runoff response to land use and land cover changes in semi-arid environments. In *Ecological Processes* (Vol. 5, Issue 1). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1186/s13717-016-0060-6>
- Sambito, M., Severino, A., Freni, G., & Neduzha, L. (2021). A systematic review of the hydrological, environmental and durability performance of permeable pavement systems. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 8). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su13084509>
- Sanipatín, M., & Pazmiño, H. (2024). *Características físicas e hidráulicas del pavimento rígido existente en la vía Balbanera – Pallatanga en la provincia de Chimborazo* [Universidad Nacional de Chimborazo]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/13077>
- Zárate Juan. (2019). *Plan de mantenimiento vial para la vía Biblián – Zhud, en los tramos de pavimento rígido*. [Magister en Ingeniería en Vialidad y Transportes]. Universidad de Cuenca.