

19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)

GEOESTATÍSTICA APLICADA PARA DEFINIÇÃO DE ÁREAS DE IMPLANTAÇÃO DE DRENOS EM PAVIMENTOS

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Felipe H. Cava¹; Carlos Y. Suzuki²; Caio R.G. Santos³; Flaviane M.L. Vallejo³ & Angela M. Azevedo⁴

RESUMO

A presença de água na estrutura dos pavimentos resulta em problemas estruturais e funcionais que comprometem seu comportamento e reduzem a vida útil. A infiltração de água nos pavimentos ocorre principalmente através de trincas e juntas, o que é agravado em regiões com maior altura pluviométrica anual. Este trabalho analisou utilizando geoestatística a pluviometria anual, os dias de chuva e a distribuição do volume diário médio de veículos comerciais no estado de São Paulo. Foram elaborados mapas de calor para cada uma das variáveis aleatórias estudadas, o que permitiu uma análise das regiões do estado de São Paulo que são prioritárias para execução de drenos subsuperficiais em pavimentos rodoviários. Observou-se regiões do Estado de SP em que ocorrem os números médios de dias com precipitações maiores que 5mm, permitindo identificar as áreas com maior ou menor incidência de impactos úmidos durante o ciclo de um ano. Com base na geoestatística, foi possível verificar as regiões onde as previsões de dispositivos de drenagem de pavimentos são prioritárias, ou as áreas com maior probabilidade de sofrerem danos relacionados à ausência de drenos subsuperficiais. Este trabalho sugere para um nível de confiança de 85% que os drenos de pavimentos devem ser executados em regiões do Estado de São Paulo que apresentem altura pluviométrica anual superior a 1200mm e VDM comercial maior do que 500 veículos.

PALAVRAS-CHAVE: Geoestatística; drenagem subsuperficial; dreno de pavimento.

ABSTRACT

The presence of water in the pavement structure results in structural and functional problems that compromise its behavior and reduce its useful life. Water infiltration into pavements occurs mainly through cracks and joints, which is aggravated in regions with higher annual rainfall. This work analysed using geostatistics the annual pluviometry, the rainy days and the distribution of the average daily volume of commercial vehicles in the state of São Paulo. Heat maps were prepared for each of the studied random variables, which allowed an analysis of the regions of the state of São Paulo that are priority for the execution of subsurface drains in road pavements. Regions of the State of SP were observed where the average number of days with precipitation greater than 5mm occurred, allowing the identification of areas with a greater or lesser incidence of wet impacts during the one-year cycle. Based on the geostatistics, it was possible to verify the regions where the predictions of pavement drainage devices are a priority, or the areas with the highest probability of suffering damages related to the absence of subsurface drains. This work suggests for a confidence level of 85% that the pavement drains should be executed in regions of the State of São Paulo that present annual rainfall superior to 1200mm and commercial VDM greater than 500 vehicles.

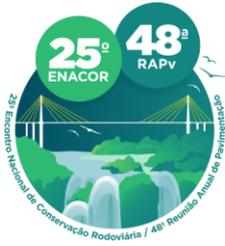
KEY WORDS: Geostatistic; subsurface drainage; pavement drainage.

¹ Centro Universitário da FEI, Departamento de Engenharia de Civil, e-mail: cava@fei.edu.br

² Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Transportes, e-mail: carlos.suzuki@planservi.com.br

³ Instituto Mauá de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, e-mail: caiorubens@maua.br; flaviane.vallejo@maua.br

⁴ Planservi Engenharia Ltda, e-mail: angela.martins@planservi.com.br



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A presença de água na estrutura de pavimentos asfálticos e de concreto resulta em problemas estruturais e que comprometem o seu desempenho. Segundo Suzuki, Azevedo e Junior (2013), existem diversos efeitos danosos da água livre na estrutura dos pavimentos, dentre eles: a redução da resistência das camadas granulares não estabilizadas e do subleito, o bombeamento de finos e formação de vazios no subleito, a redução da capacidade de suporte do subleito e a formação de trincas nos revestimentos em função do contato direto com a água.

A infiltração de águas de chuva no pavimento pode ocorrer pela elevada permeabilidade dos materiais utilizados no revestimento, pelas juntas de construção ou pelas fissuras e trincas que surgem na camada superficial, devido ao processo de fadiga, proporcionado pelas solicitações dinâmicas do tráfego (SUZUKI, AZEVEDO e JUNIOR, 2013).

A probabilidade de infiltração aumenta nas regiões onde ocorrem maior precipitação pluviométrica em termos de dias chuvosos e total acumulado, ou em locais que os pavimentos são mais solicitados diariamente pelos veículos comerciais. Os estudos desenvolvidos Cedergren (1970) revelaram que a água livre infiltrada e armazenada nas estruturas do pavimento era o principal responsável pelos pífios desempenhos funcional e estrutural das rodovias pavimentadas.

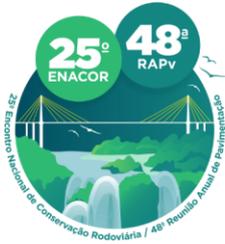
A maioria dos métodos de dimensionamento estrutural de pavimentos atuais não apresentam considerações inerentes para os danos produzidos pelo tráfego durante os períodos úmidos, razão pela qual a vida útil dos pavimentos tem sido reduzida e excessivos reparos, reforços e reposições têm sido executados, antes de ser atingido o período de duração previsto em projeto. De acordo com o DNIT (2006), os drenos de pavimento são necessários para regiões em que a precipitação anual é superior a 1500 milímetros e o tráfego é superior a 500 veículos comerciais diários.

A maioria dos pavimentos rodoviários para tráfego pesado construídos no passado no Estado de São Paulo é constituída de sistemas pouco drenantes, em grande parte porque as práticas de projeto enfatizavam a densidade e a estabilidade, em vez de dar prioridade à drenagem das águas infiltradas pela superfície. Entretanto, nos períodos em que os pavimentos eram solicitados pelo tráfego pesado e que sua estrutura continha água livre, os índices de produção de danos foram inúmeras vezes maiores que quando a água livre não estava presente (SUZUKI, AZEVEDO e JUNIOR, 2013).

Estes pavimentos não drenados têm apresentado custos crescentes de conservação e restauração exigindo espessuras de reforços cada vez maiores. Objetivando minimizar os custos de manutenção e aumentar a vida útil dos pavimentos a longo prazo, é fundamental que as normas e diretrizes de projeto sejam revisadas e até modificadas de maneira a produzirem estruturas capazes de se isentarem da água livre tão logo ela infiltre pela superfície.

Os desempenhos desses pavimentos podem ser melhorados retirando-se o mais rápido possível a água zenital infiltrada ou minimizando o tempo que ela fica instalada e represada no interior de sua estrutura, por meio de um sistema de drenagem subsuperficial devidamente concebido, projetado, instalado e mantido.

Como a instalação de dispositivos eficazes de drenagem subsuperficial em pavimentos novos elevavam ligeiramente os custos de implantação, eles quase nunca eram incluídos (exceto para o rebaixamento do lençol freático). Entretanto, sua omissão proporcionou em muitos casos



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



diminuição na vida útil e aumentou os custos de reparo e de reposição muito mais que o custo adicional de uma boa drenagem.

A maioria dos pavimentos construídos nas décadas passadas foram projetados sem a rápida eliminação da água. Assim cada impacto por carga pesada faz com que a água se movimente pela interface entre o revestimento e sua base erodindo o material e ejetando-o através das trincas e juntas, produzindo vazios e cavidades que enfraquece o pavimento resultando em desnivelamento e outros danos, conduzindo a total falência da estrutura (SUZUKI, AZEVEDO e JUNIOR, 2013).

Assim, nos projetos atuais de ampliações de faixas, de duplicações, de alargamentos de pistas, em que estão sendo previstas instalações de drenos – retrofits, é importante que suas utilizações sejam devidamente concebidas para aumentar a eficiência e eficácia de seus desempenhos hidráulicos e funcional.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar por meio da aplicação de geoestatística as regiões do estado de São Paulo que são prioritárias para a execução de drenos subsuperficiais em pavimentos.

REFERENCIAL TEÓRICO

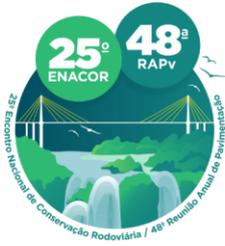
A geoestatística é um campo derivado da estatística tradicional que busca analisar variáveis que apresentam padrões regionais ou estão distribuídas no espaço. Inicialmente, seu principal propósito era estimar a quantidade de minerais em uma determinada região a ser explorada. (KRIGE, 1951).

De acordo com Matheron (1971), uma variável regionalizada pode ser descrita como uma combinação de uma região aleatória e outra estruturada, sendo esta última responsável por caracterizar o fenômeno regionalizado. Segundo Wackernagel (2003), a união dos aspectos de regionalização e aleatoriedade resulta em uma função aleatória. Leuanghtong et al. (2008) afirmam que a geoestatística tem como objetivo analisar os padrões espaciais em variáveis regionalizadas através do uso de variogramas.

De acordo com Yamamoto (2020), a variância espacial é calculada pela Equação 1, onde $Z(x)$ representa a variável regionalizada no ponto x , $Z(x+h)$ é a variável regionalizada a uma distância h do ponto x , e n representa o número de pares de pontos separados pela distância h . A Figura 1 ilustra os componentes de um variograma, incluindo o efeito pepita, a amplitude, o patamar e as regiões de campo estruturado e aleatório.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \cdot \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (1)$$

De acordo com Yamamoto (2020), os elementos do variograma possuem os seguintes significados: amplitude é a distância em que as amostras começam a ser independentes, ou seja, não possuem correlação espacial. Opatamar do variograma representa a soma da variância aleatória, que ocorre devido ao efeito pepita, com a variância espacial. O efeito pepita, por sua vez, consiste em uma variância presente na origem do variograma, resultante da combinação da variabilidade do fenômeno espacial com a incerteza devido ao número de amostras.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

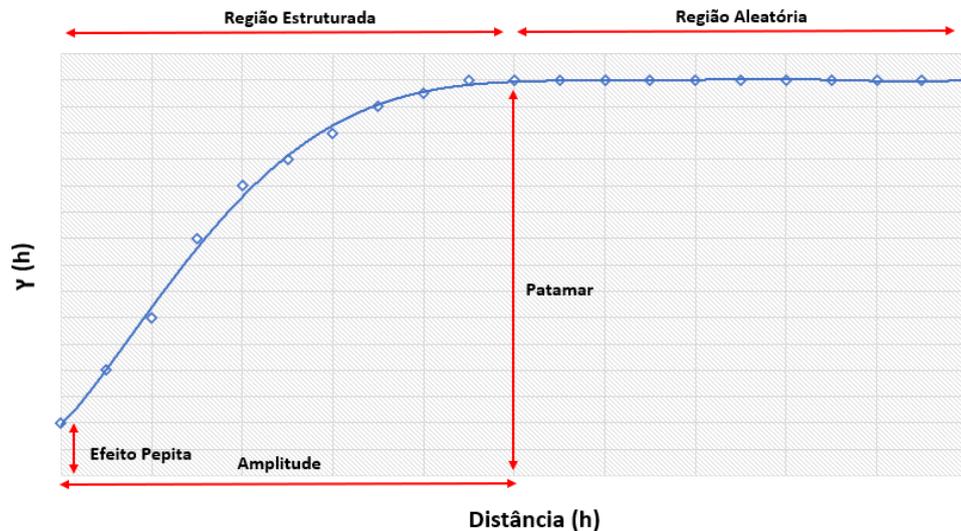


Figura 1 – Elementos do variograma experimental (AUTORES, 2023)

MÉTODO

Este trabalho utilizou os dados de precipitação pluviométrica distribuídas no Estado de São Paulo, os quais foram obtidos em publicações disponibilizadas pelo DAEE entre 1976 e 2022, e dados de contagem volumétrica de veículos comerciais, obtidos em publicações que são disponibilizadas pelo DER/SP para o ano de 2022. Dentre essas informações, foram analisados 75 postos de dados pluviométricos e 264 postos de contagem de tráfego. A Figura 2a ilustra os pontos de contagem de tráfego no Estado de São Paulo e a Figura 2b os postos pluviométricos.

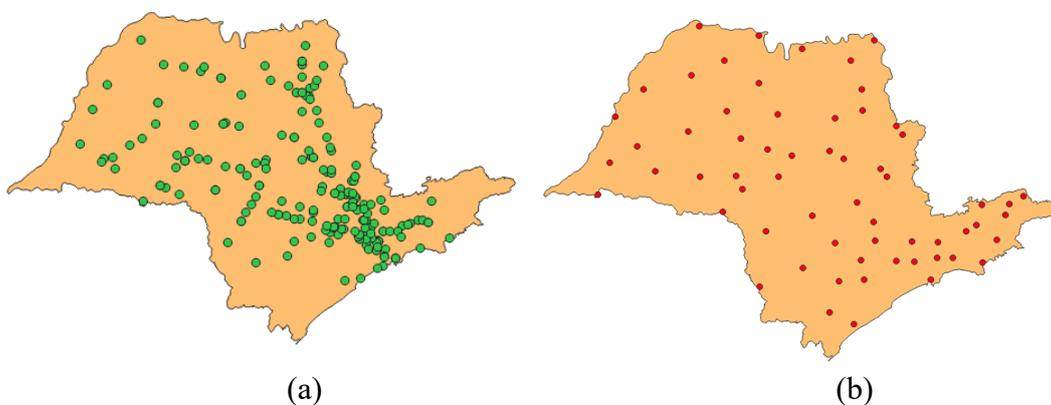
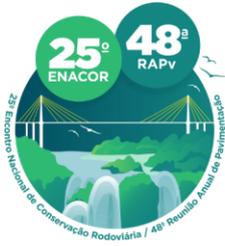


Figura 2 – Postos de coleta de dados: (a) Tráfego; (b) pluviométricos (AUTORES, 2023)

Elaborou-se com base na geoestatística três mapas temáticos, sendo para: precipitação total acumulada no ano, número de dias do ano com chuvas superiores a 5mm e volume diário médio de veículos comerciais. A geoestatística foi realizada utilizando krigagem ordinária por meio do software SAGA, sendo considerada para modelagem do variograma a função que resulta no maior coeficiente de determinação para cada um dos modelos.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Estatística

Com base em cada uma das variáveis aleatórias envolvidas neste trabalho, a Tabela 1 apresenta um resumo dos parâmetros estatísticos. Observa-se que o VDM comercial mínimo nos postos de contagem de tráfego utilizados neste trabalho é de 501 veículos e o máximo é de 19634 veículos. Os dados levam em consideração diversas rodovias do Estado de São Paulo, o que resulta em um desvio padrão elevado.

Por outro lado, a variância de dados pluviométricos no estado de São Paulo é menor e, assim, observa-se precipitação anual máxima de 3128mm e mínima de 1168mm. Conforme pode-se observar, chove em média no Estado de São Paulo, 1530mm. Pelas características geomorfológicas, as regiões com maiores precipitações estão localizadas no litoral, ocorrendo diminuições à medida que se caminha para o interior, até atingir a divisa com o Estado de Mato Grosso do Sul.

Em média, pode-se esperar que 70 dias do ano serão chuvosos, correspondendo aproximadamente 19% do tempo. Dentre os postos analisados, verificou-se que o número de dias chuvosos oscila entre 56 e 103, ou seja, entre 15% e quase 30% do tempo. Ao longo da série histórica de dados analisados, não foram ainda detectadas visivelmente oscilações significativas nos parâmetros de precipitação, que evidenciam problemas relacionados a mudança climática do planeta por conta do efeito estufa.

Tabela 1 – Resumo dos parâmetros estatísticos (AUTORES, 2023)

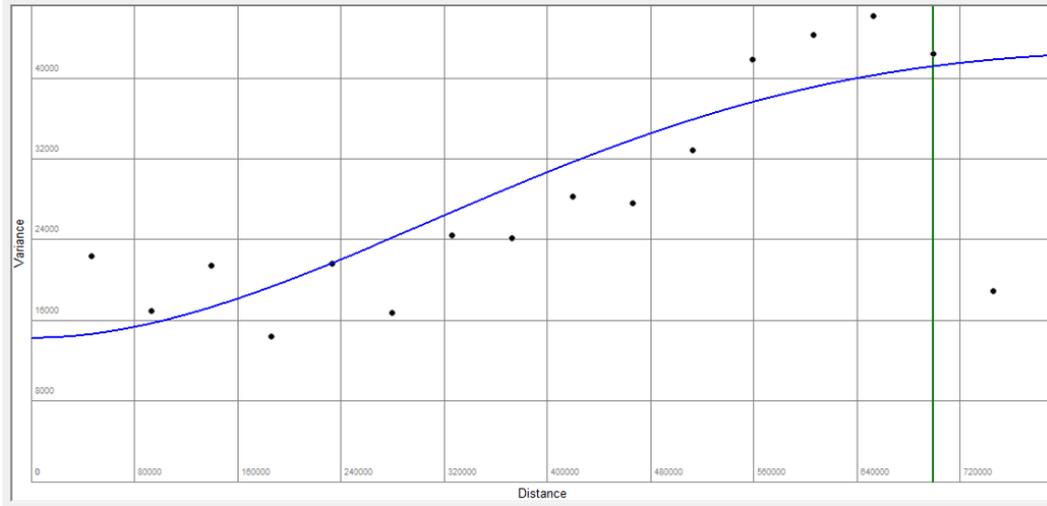
Parâmetro Estatístico	Média de dias com chuva (>5mm)	% dias com chuva (>5mm)	Precipitação anual (mm)	VDM comercial
Média	69,54	19,05	1530,32	2629,28
Desvio Padrão	10,52	2,88	325,12	2535,24
Máximo	103,05	28,23	3128,24	19634,00
Mínimo	56,00	15,34	1168,36	501,00

Análise Geoestatística

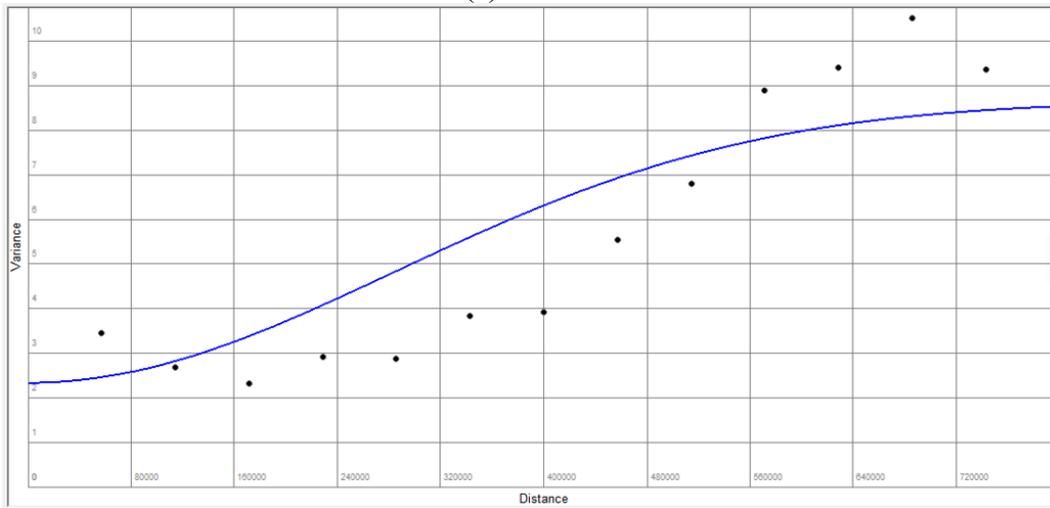
Para os estudos geoestatísticos, foram elaborados os variogramas de cada uma das variáveis aleatórias estudadas neste trabalho, conforme a Figura 3. Foram consideradas para a modelagem as funções que resultaram nas melhores correlações espaciais dos dados. A saber, a precipitação foi modelada como uma função cúbica, a porcentagem de dias de chuva por uma função gaussiana e o tráfego como uma função logarítmica com coeficientes de determinação de 0,77, 0,59 e 0,63, respectivamente.



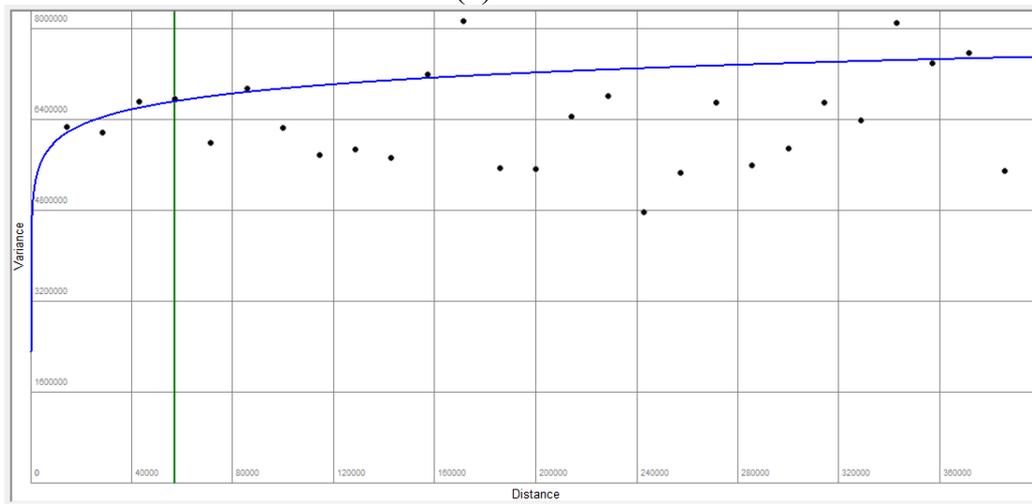
19 a 22 de Setembro de 2023
 Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



(a)

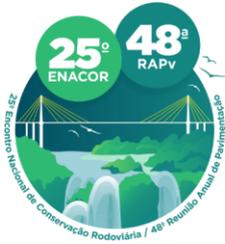


(b)



(c)

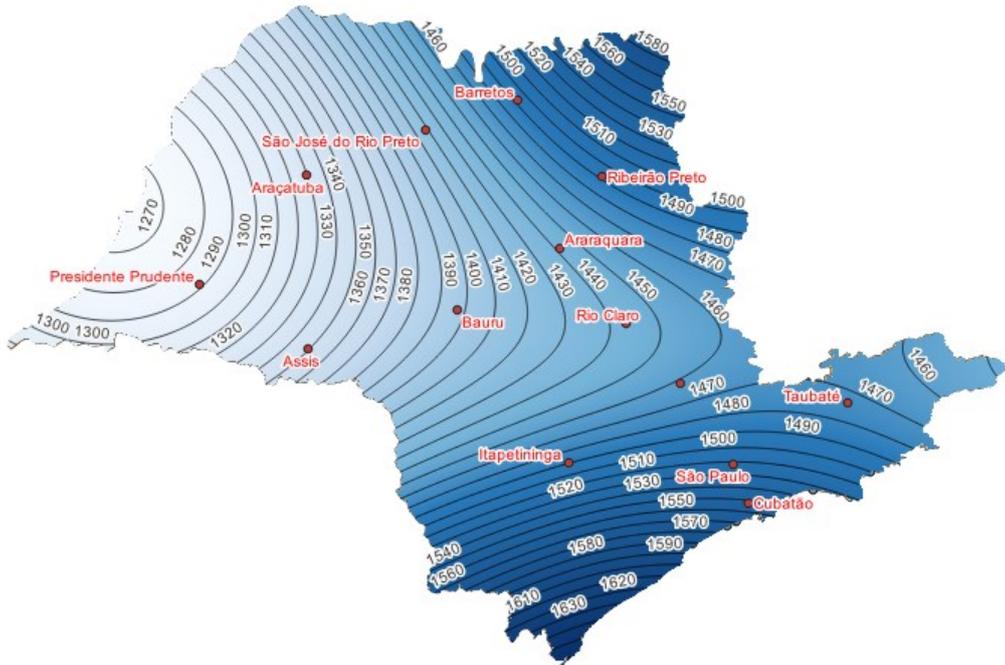
Figura 3 – Variogramas: (a) precipitação anual; (b) % dias de chuva; (c) tráfego (AUTORES, 2023)



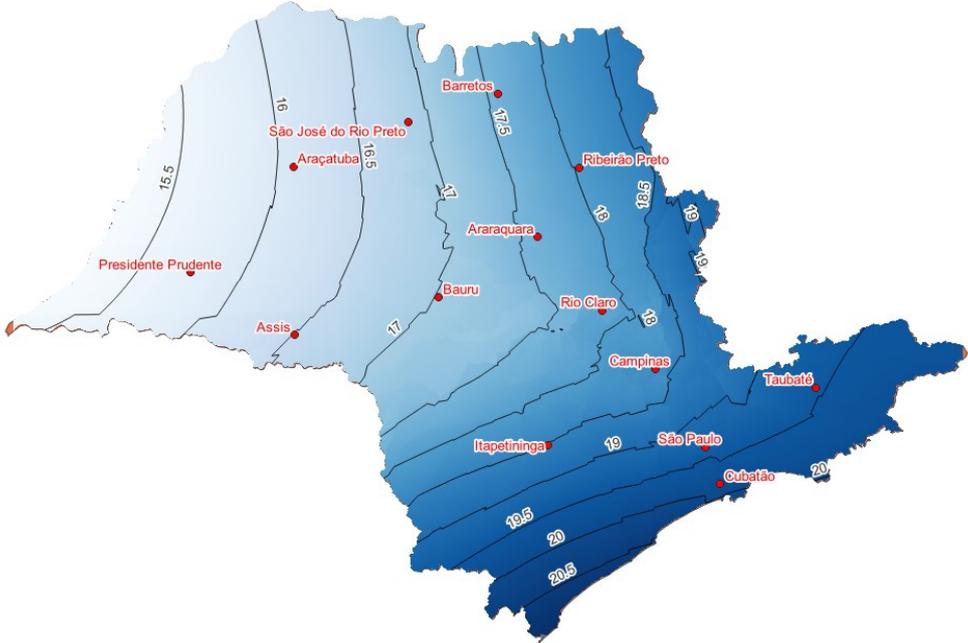
19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br



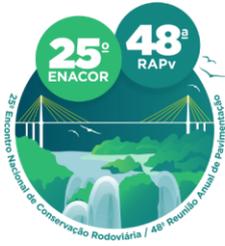
Por meio do *software* SAGA, foram elaboradas as krigagens ordinárias para cada uma das variáveis aleatórias. A Figura 4 ilustra as krigagens no estado de São Paulo para precipitação (Figura 4a), dias de chuva (Figura 4b) e Tráfego (Figura 4c). Observa-se uma correlação entre as variáveis de porcentagem de dias de chuva e precipitação anual, conforme esperado. Além disso, a região no entorno do município de São Paulo apresenta a maior intensidade de tráfego, indicada pela escala de cores tendendo ao vermelho.



(a)

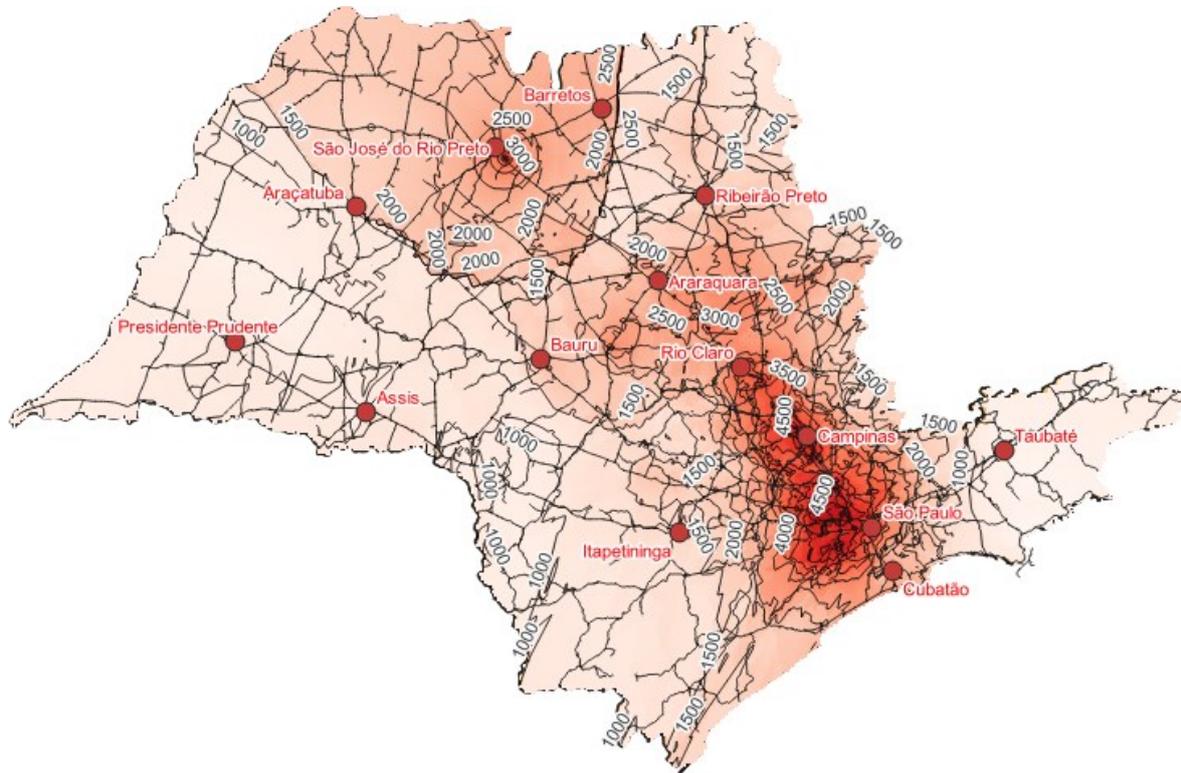


(b)



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



(c)

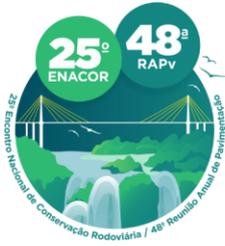
Figura 4 – Krigagem ordinária: (a) Precipitação; (b) % Dias de chuva; (c) Tráfego (AUTORES, 2023)

A Figura 5 ilustra a sobreposição dos contornos de precipitação anual no mapa de calor de volume diário médio de veículos comerciais no Estado de São Paulo. O DNIT (2006), fundamentado nos trabalhos de Cedergren (1970), e nas observações da AASHTO (1993), recomenda a utilização de drenos subsuperficiais nos locais em que a precipitação média anual é superior a 1500mm e os volumes diários de veículos comerciais excedem 500 caminhões.

A rodovia com menor VDM comercial do estado de São Paulo, utilizada neste trabalho, apresenta 501 veículos. Os municípios de Rio Claro, Campinas e São Paulo estão localizados em uma região com elevada intensidade de tráfego, com VDM comercial superior a 4500 veículos.

Observa-se que dos municípios pertencentes à região de maior intensidade de tráfego, isto é, tráfego superior a 4500 veículos comerciais diários, apenas São Paulo apresenta precipitação superior a 1500 milímetros. Na situação atual das recomendações do DNIT (2006), apenas o município de São Paulo estaria em uma região de convergência dos valores de tráfego e intensidade de chuva para a necessidade de implantação de drenos em pavimentos.

Estes outros municípios, embora tenham elevado volume de tráfego, apresentam valores de precipitação inferiores ao recomendado para necessidade de implantação dos drenos de pavimentos. Nesta condição, a água infiltrada por trincas poderia ficar armazenada nas camadas inferiores destes pavimentos e, com o alto tráfego, o dano resultante seria ainda maior nestas rodovias. A depender da permeabilidade das camadas do pavimento, a saturação e os problemas decorrentes da infiltração das águas pluviais podem ser ainda mais danosas à estrutura do pavimento.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

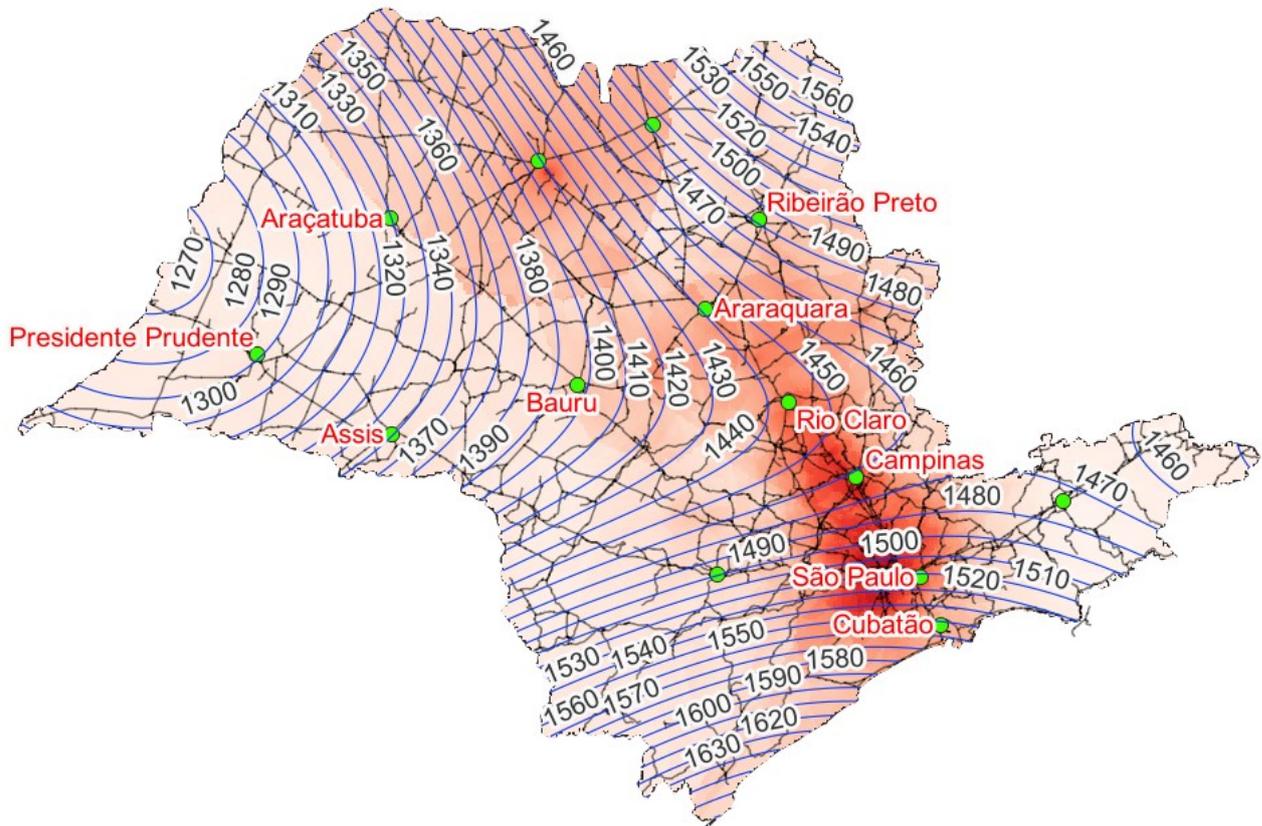


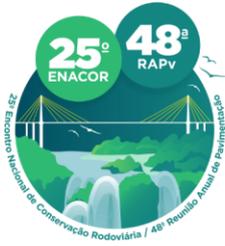
Figura 5 – Mapa para definição de drenos em pavimentos (AUTORES, 2023)

Assim, acredita-se que tais valores não estão compatíveis com o clima do Brasil e com as regiões de maior solicitação no Estado de São Paulo, uma vez que o valor utilizado para recomendação da intensidade de precipitação é similar à média dos dados no estado de São Paulo. Ou seja, a recomendação utilizada para implantação de drenos em pavimentos atende 50% dos casos no Estado de São Paulo, mas desconsidera a distribuição espacial. Assim, parte da região mais solicitada quanto ao tráfego acaba ficando suscetível a maior deterioração em épocas chuvosas.

Os autores acreditam que o valor recomendado para implantação de drenos em pavimentos rodoviários deve ser definido em função dos dados históricos que são disponibilizados por órgãos responsáveis, definindo certo nível de confiabilidade para majorar o desempenho do sistema de drenagem e dos pavimentos rodoviários. Além disso, acredita-se que a distribuição espacial não deve ser desconsiderada para a análise de implantação de drenos.

Desta forma, levando em consideração os efeitos adversos da água na estrutura do pavimento, considera-se que a precipitação máxima anual deveria sofrer uma redução para admitir maior confiabilidade ao comportamento da estrutura.

Para os dados utilizados na elaboração deste trabalho, disponibilizados pelo DAEE entre 1976 e 2022, observou-se que a média de precipitação é de cerca de 1530mm e desvio padrão de 325mm. Assumindo uma distribuição normal dos dados de precipitação, para uma confiabilidade de 85%, o valor de precipitação total poderia ser alterado para 1200mm/ano, em vez de 1500mm/ano, para utilização do dreno de pavimentos.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



A redução do critério para implantação de drenos em pavimentos resultaria em uma agregação de valor para a rodovia, permitindo assim pavimentos melhores em épocas chuvosas. Além disso, o valor sugerido de 1200mm anuais compreende as regiões mais críticas quanto ao tráfego e clima, o que permite uma consideração espacial para a implantação dos drenos de pavimentos.

CONCLUSÕES

Inevitavelmente as estruturas de pavimento se deterioram com o tempo, frente as solicitações do tráfego e devido às ações das intempéries, ocorrendo fissuras e trincas superficiais no revestimento. Dependendo da forma e frequência de conserva e manutenção realizada é grande a possibilidade de infiltração de águas de chuva, através de sua enorme área de exposição.

Com a infiltração as camadas poderão ficar com umidade excessiva, por longos períodos principalmente se as declividades transversais das pistas não forem adequadas, saídas laterais pelos acostamentos estiverem bloqueadas ou devido à permeabilidade dos materiais. O teor de umidade próximo da saturação poderá causar diminuição da capacidade de suporte do subleito, diminuição dos módulos de resiliência dos materiais granulares não estabilizados e conseqüentemente acréscimo nas deflexões e no estado de tensões atuantes na estrutura.

Em função dos dados coletados de precipitação anual e de volumes de tráfego distribuídos geograficamente pelo Estado, os estudos geoestatísticos desenvolvidos neste trabalho ilustram as regiões prioritárias para atendimento das recomendações propostas pelo Manual de Drenagem.

Observou-se regiões do Estado de SP em que ocorrem os números médios de dias com precipitações maiores que 5mm, permitindo identificar as áreas com maior ou menor incidência de impactos úmidos durante o ciclo de um ano. Com base nos mapas de calor desenvolvidos, foi possível verificar as regiões onde as previsões de dispositivos de drenagem de pavimentos são prioritárias, ou as áreas com maior probabilidade de sofrerem danos relacionados à ausência de drenos subsuperficiais.

Esta análise permitiu identificar que a atual recomendação de implantação de drenos em pavimentos rodoviários não é satisfeita por diversos municípios do Estado de São Paulo, embora estes apresentem elevado volume de tráfego. Assim, os autores recomendam que as regiões do Estado de São Paulo com precipitação superior a 1200mm por ano devem implantar drenos subsuperficiais em pavimentos, para majorar o desempenho dos pavimentos rodoviários e evitar danos causados pela saturação das camadas da estrutura.

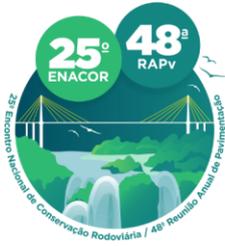
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide for Design of Pavement Structures. Washington D. C., 1993

Albuquerque, F.S. Sistema de gerência de pavimento para departamento de estradas do nordeste brasileiro. Tese de Doutorado: Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

Albuquerque, F.S; Nunez, W.P. Otimização do monitoramento de bacias deflectométricas para gerência de pavimentos pelo uso da geoestatística. Revista Transportes, v.20, n.1, 2012.

Al-kazaz, A.B; Ewadh, H.A. Spatial analyses of pavement condition at intersection sites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Almeida, A.F.M; Oliveira, F.H.L. Análise da macrotextura de pistas de pouso e decolagem por meio da geoestatística. SITRAER Airport Transportation Symposium, São José dos Campos, 2022a.

Almeida, A.F.M; Oliveira, F.H.L. Análise do Pavement Condition Index Aeroportuário com uso de estatística espacial. SITRAER Airport Transportation Symposium, São José dos Campos, 2022b.

American Association of State Highway And Transportation Officials (AASHTO). Mechanistic-empirical pavement design guide: a manual of practice. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, USA, 2008.

CEDERGREN, H.R. Drainage of Highway and Airfield Pavements. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1974.

Departamento Estradas de Rodagem (DER). Volume diário médio das rodovias (VDM). Acesso em: 21 de novembro de 2022. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br/WebSite/MalhaRodoviaria/VolumeDiario.aspx>>

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Manual de Drenagem de Rodovias – Publicação IPR-724 – 2ed. Rio de Janeiro, 2006

Krige, D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 52(6): 119-139, 1951.

Leuangthong, O.; Khan, K.D; Deutsch, C.V. Solved Problems in geostatistics. Hoboken, John Wiley & Sons, 2008.

Mantesso-Neto, V; Ribeiro, R.R; Garcia, N.G.M; Del Lama, E.A; Theodorovicz, A. Patrimônio geológico no estado de São Paulo. Boletim paranaense de geociências, volume 70, pg 53-76, 2013.

Matheron, G. The theory of regionalized variables and its applications. Fontainebleau, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 1971.

Olea, R.A. Geostatistical glossary, and multilingual dictionary. New York, Oxford University Press, 177p, 1991.

Oliveira, B.R; Antônio, G.B. Modelagem geoestatística aplicada a geologia de engenharia. Boletim paranaense de geociências, volume 73, p46-53, 2017.

Ribeiro, A.J.A; Silva, C.A.U; Barroso, S.H.A. Metodologia de baixo custo para mapeamento geotécnico aplicado à pavimentação. Revista Transportes, 2017.

SUZUKI C. Y., AZEVEDO A. M., KABBACH JR. F. I. Drenagem Subsuperficial de pavimentos – Conceitos e Dimensionamento. Oficina de Textos: São Paulo, 2013.

Wackernagel, H. Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications. xiv 256 pp. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1995.

Wackernagel, H. Multivariate geostatistics – an introduction with application. Berlin, Springer, 2003.

Yamamoto, J.K; Landim, P.M.B. Geoestatística: Conceitos e aplicações. São Paulo, Oficina de Textos, 215p, 2013.

Yamamoto, J.K. Análise geoestatística. In: Yamamoto, J.K (org.) Avaliação e classificação de recursos minerais. São Paulo, EDUSP, 2001.

Yamamoto, J.K. Estatística, análise e interpretação de dados geoespaciais. São Paulo: Gráfica Paulos, 2020.