

## Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

---

# Análise geoestatística de um experimento sob delineamento sistemático tipo “leque”

João Vitor Teodoro<sup>1</sup>

UFTM, Iturama, MG

Sônia Maria De Stefano Piedade<sup>2</sup>

Esalq-USP, Piracicaba, SP

Ulcilea Alves Severino Leal<sup>3</sup>

UFTM, Iturama, MG

**Resumo.** A Canafistula (*Peltophorum dubium*) é uma espécie arbórea cujo crescimento é rápido, sua madeira é densa e altamente resistente a fungos e cupins, sendo muito valorizada economicamente. Diante da prática de seu plantio, buscamos identificar a distribuição da altura, do diâmetro do fuste, do diâmetro da copa, da área da copa e do volume cilíndrico diante de uma série de espaçamentos determinados pelo delineamento sistemático tipo “leque” [5]. Para isto, foi realizada a análise da dependência espacial por meio da elaboração do semivariograma, com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca e do avaliador de dependência espacial. Foi realizada a seleção do modelo, sendo possível identificar o alcance e gerar a krigagem.

**Palavras-chave.** Floresta, Geoestatística, Krigagem.

## 1 Introdução

Os sistemas de produção, independente da área, necessitam ser cada vez mais sustentáveis. Há alguns anos, a exploração dos recursos naturais era realizado sem qualquer preocupação com os impactos causados, como se o objeto de exploração fizesse parte de uma fonte inesgotável. Atualmente, após sofrermos efeitos de tais impactos, e impulsionados por campanhas de conscientização e políticas de incentivos, buscamos práticas renováveis que tragam maiores benefícios como qualidade, quantidade e lucro, sob aspectos como baixo custo e tempo reduzido.

A disposição experimental em delineamento sistemático tipo “leque” [5] possibilita, por meio da disponibilidade de uma área relativamente pequena e com quantidade não exagerada de observações, avaliar uma grande quantidade de espaçamentos entre as árvores. A determinação do espaçamento é um dos fatores mais importantes na produção florestal, pois, se houver um espaçamento exagerado, ocorrerá desperdício de área de produção e,

---

<sup>1</sup>joao.magda@gmail.com

<sup>2</sup>soniamsp@usp.br

<sup>3</sup>ulcilea.leal@uftm.edu.br

para espaçamentos reduzidos, as árvores podem se desenvolver com características de interesse econômico prejudicadas; assim, se faz necessário identificar, para cada atributo, o espaçamento ótimo entre árvores. Por conta da grande demanda de terreno e de mudas, alguns delineamentos florestais diferentes do esquema de Nelder são muitas vezes inviáveis, relevando ainda mais a importância deste esquema.

## 2 Material e Métodos

O experimento foi instalado e conduzido conforme descrito por [3], com o plantio das mudas de Canafístula (*Peltophorum dubium*), em dezembro de 2010, na Fazenda Experimental da Universidade Federal da Grande Dourados com latitude 22° 13' 18.54"S e longitude 54° 48' 23.09"O, altitude média de 412 m, no município de Dourados-MS. O clima é classificado como tropical úmido Aw [2], com estação chuvosa no verão e seca no inverno. A área apresenta topografia plana e o solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico textura muito argilosa. Os valores para a caracterização inicial da fertilidade do solo são apresentados para as profundidades de 0-20 cm: MO (3,2 %), pH CaCl<sub>2</sub> (5,7), P (8 mg dm<sup>-3</sup>); K<sup>+</sup>(4,4 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); Ca<sup>2+</sup>(6,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), Mg<sup>2+</sup>(2,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>(2,3 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), SB (90,9 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), CTC (113,9 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), V% (79,2 %), conforme análise química realizada no Laboratório de Fertilidade dos Solos da UFGD.

As mudas de Canafístula utilizadas no plantio (2009) foram obtidas do viveiro municipal de São Gabriel do Oeste e apresentavam altura média de 20 cm. A disposição das plantas ocorreu de forma aleatória, obedecendo ao desenho proposto por [5] (Figura 1), sendo as distâncias e ângulos determinados conforme [4], com raio dado por (1) e área de cada planta segundo (2), (3) e Figura 2:

$$r_n = r_0 \alpha^n \tag{1}$$

$$A_n = \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[ \left(\frac{r_n^2}{4}\right) f(\alpha) \right] \tag{2}$$

$$f(\alpha) = (1 + \alpha)^2 - (1 + \alpha^{-1})^2 \tag{3}$$

em que,

$A_n$  é a área da planta  $n$  em cada raio;

$\alpha$  é a constante que determina a razão de mudança no crescimento do espaçamento;

$r_n$  é a distância radial para a  $n$ ésima planta e  $r_0$  para a primeira planta de cada raio;

$\theta$  é o ângulo entre raios adjacentes.

Foram estabelecidos 22 círculos concêntricos e 24 raios, com ângulo  $\theta = 15^\circ$  entre raios adjacentes (Figura 1), totalizando 528 mudas plantadas, observando-se uma taxa de redução de 12,5 % na densidade das árvores. Isso resultou em acréscimo de 6,066% na distância para cada novo círculo, representando  $\alpha$  de 1,06066. Os dois círculos internos e os dois externos foram considerados como bordaduras.

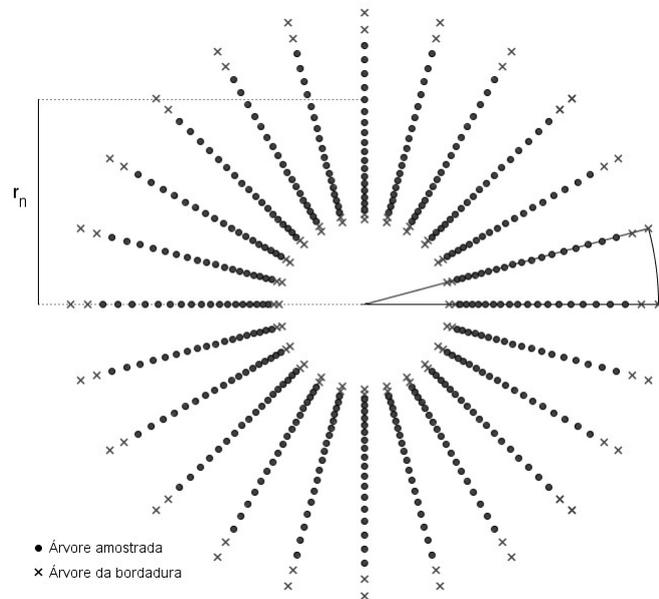


Figura 1: Delineamento sistemático tipo “leque” proposto por [5].

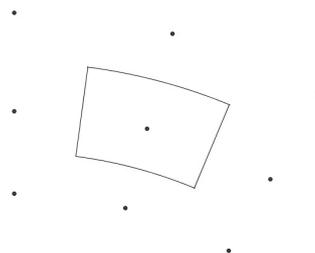


Figura 2: Área da planta.

Conforme [3], foram mensurados o comprimento da circunferência a 1,3 m de altura ( $C$ ), a altura total das árvores ( $A$ ) e o diâmetro de copa ( $DC$ ), utilizando-se fita métrica e régua graduada. Assim, para o cálculo do diâmetro do fuste considerou-se a relação  $DF = C/\pi$ , e para o cálculo do volume cilíndrico ( $VC$ ) foi utilizada a relação  $VC = [\pi/(DF^2/4)] \times A$ . Já para o estabelecimento do diâmetro da copa ( $DC$ ) foram realizadas duas medições perpendiculares dos diâmetros da projeção da copa.

Na análise geoestatística, para cada atributo foi efetuada a análise da dependência espacial por meio da elaboração do semivariograma, com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca e do avaliador de dependência espacial [3]. Desta forma, foi realizada a seleção do modelo por meio da observação dos maiores avaliadores de dependência espacial, menores somas dos quadrados dos resíduos e maiores coeficientes de determinação, sendo possível identificar o alcance e gerar a krigagem. Estas análises foram realizadas utilizando-se o software *Gamma Design GS+* versão 9.0.

### 3 Resultados e Discussão

Observou-se o melhor ajuste para cada modelo, por meio dos maiores coeficientes de determinação e menores somas dos quadrados dos resíduos e verificou-se a existência da dependência espacial por meio do avaliador de dependência espacial (ADE). Na Tabela 1 seguem os resultados obtidos para o ajuste para cada variável. A Figura 3 apresenta os semivariogramas para 37 meses após o plantio e a Figura 4 as krigagens.

Tabela 1: Parâmetros dos semivariogramas

Variável	Modelo	$C_0$	$C_0 + C$	A	$r^2$	SQR	ADE
A6	Esf.	$1,095 \times 10^{-2}$	$3,138 \times 10^{-2}$	37,5	0,912	$7,032 \times 10^{-5}$	65,1%
A13	Esf.	$1,480 \times 10^{-2}$	$6,230 \times 10^{-2}$	34,7	0,917	$3,384 \times 10^{-4}$	76,2%
A25	Esf.	$9,200 \times 10^{-3}$	$9,340 \times 10^{-2}$	38,0	0,926	$1,088 \times 10^{-3}$	90,1%
A37	Esf.	$1,390 \times 10^{-2}$	$1,188 \times 10^{-1}$	40,1	0,971	$6,243 \times 10^{-4}$	88,3%
DF13	Esf.	$1,834 \times 10^{-6}$	$1,834 \times 10^{-5}$	35,8	0,960	$1,982 \times 10^{-11}$	90,1%
DF25	Esf.	$1,600 \times 10^{-6}$	$3,910 \times 10^{-5}$	36,9	0,980	$5,270 \times 10^{-11}$	95,9%
DF37	Esf.	$3,900 \times 10^{-6}$	$3,580 \times 10^{-5}$	35,1	0,949	$9,189 \times 10^{-11}$	89,1%
DC13	Exp.	$5,240 \times 10^{-2}$	$3,048 \times 10^{-1}$	31,5	0,912	$6,029 \times 10^{-3}$	82,8%
DC25	Exp.	$1,150 \times 10^{-1}$	$3,380 \times 10^{-1}$	27,9	0,832	$9,240 \times 10^{-3}$	66,0%
DC37	Exp.	$1,553 \times 10^{-1}$	$4,096 \times 10^{-1}$	24,6	0,908	$5,449 \times 10^{-3}$	62,1%
AC13	Exp.	$1,120 \times 10^0$	$8,347 \times 10^0$	31,8	0,886	$6,760 \times 10^0$	86,6%
AC25	Exp.	$4,060 \times 10^0$	$1,398 \times 10^1$	29,4	0,710	$1,860 \times 10^1$	71,0%
AC37	Exp.	$7,180 \times 10^0$	$2,117 \times 10^1$	22,8	0,907	$1,860 \times 10^1$	66,1%
VC13	Exp.	$2,580 \times 10^{-8}$	$2,648 \times 10^{-7}$	33,6	0,939	$3,790 \times 10^{-15}$	90,2%
VC25	Exp.	$1,900 \times 10^{-7}$	$3,700 \times 10^{-6}$	39,3	0,978	$3,289 \times 10^{-13}$	94,9%
VC37	Exp.	$3,200 \times 10^{-7}$	$3,920 \times 10^{-6}$	25,5	0,939	$7,221 \times 10^{-13}$	91,8%

Esf.: Esférico; Exp.: Exponencial;  $C_0$ : Efeito pepita;  $C + C_0$ : Patamar; A: Alcance;  $r^2$ : Coeficiente de determinação; SQR: Soma de quadrados dos resíduos; ADE: Avaliador de dependência espacial; A: Altura; DF: Diâmetro do fuste; DC: Diâmetro da copa; AC: Área da copa; VC: Volume cilíndrico; Os valores que procedem A, DF, DC, AC e VC correspondem à quantidade de meses após o plantio das mudas.

Conforme Tabela 1, é possível concluir que o modelo esférico foi o que melhor se ajustou às variáveis altura (A) e diâmetro do fuste (DF), para em todos os tempos após o plantio, já para as variáveis diâmetro da copa (DC), área da copa (AC) e volume cilíndrico (VC), o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou, em todos os tempos após o plantio.

Para a altura (A), as estimativas dos parâmetros de efeito pepita ( $C_0$ ) e patamar ( $C + C_0$ ) aumentaram do tempo 6 a 37 meses, já o alcance (A), que é de 37,5 m aos 6 meses, foi reduzido aos 13 meses para 34,7 m, para 25 e 37 meses houve seu aumento para, respectivamente 38 m e 40,1 m. O avaliador de dependência espacial (ADE) foi mediano aos 6 meses, tornando forte a partir do tempo 13 meses após plantio (Tabela 1).

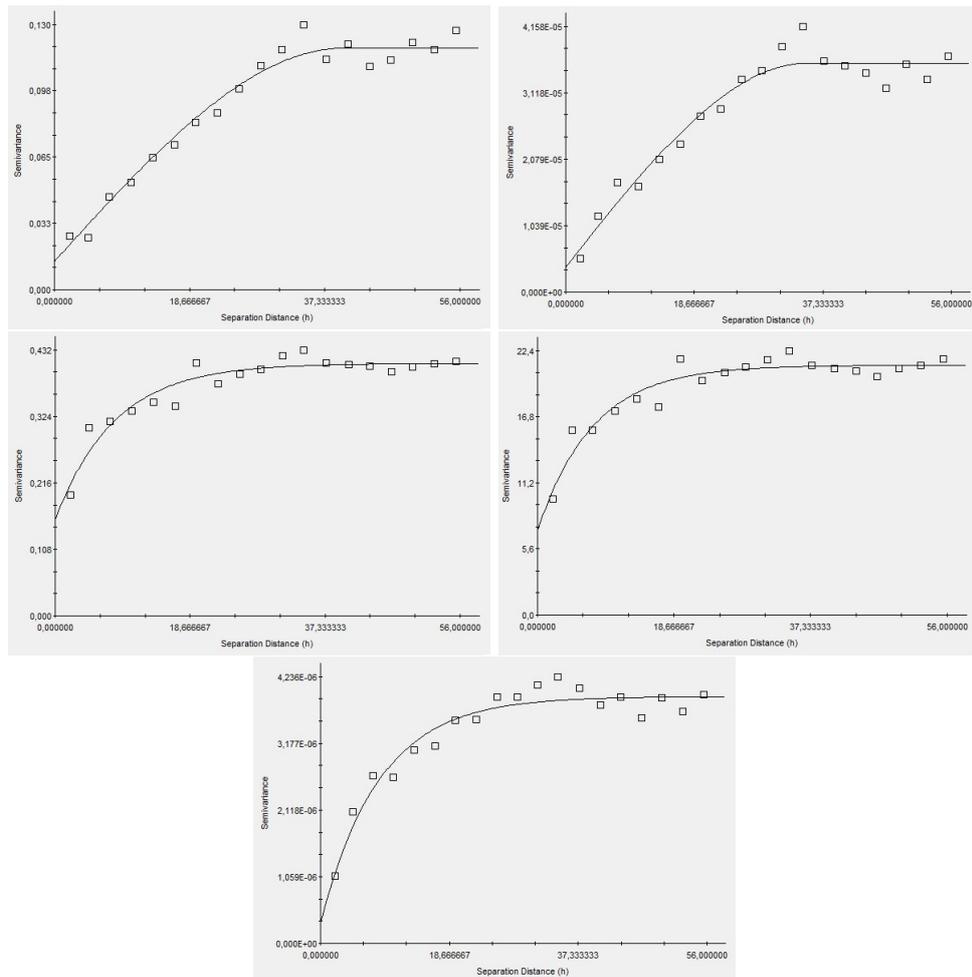


Figura 3: Semivariogramas das variáveis altura, diâmetro do fuste, diâmetro da copa, área da copa e volume cilíndrico, respectivamente, aos 37 meses após o plantio.

O diâmetro do fuste (DF) teve as estimativas do efeito pepita ( $C_0$ ) aumentadas conforme o aumento dos tempos após o plantio medidos, já o patamar ( $C + C_0$ ) aumentou dos 13 meses para os 25 meses, reduzindo seu valor aos 37 meses após o plantio. O alcance permaneceu praticamente estável para as três medidas no tempo, variando de 35,1 m a 36,9 m. O avaliador de dependência espacial foi forte para as variáveis de diâmetro do fuste (Tabela 1).

Considerando as variáveis de diâmetro da copa (DC), as estimativas dos parâmetros de efeito pepita ( $C_0$ ) e patamar ( $C + C_0$ ) aumentaram dos 13 meses para 25 meses e dos 25 meses para 37 meses após o plantio. Já o alcance (A) foi reduzido, variando de 31,5 m aos 13 meses para 27,9 m aos 25 meses e para 24,6 m aos 37 meses após o plantio. O avaliador de dependência espacial apresentou-se forte para os 13 meses e mediano para os demais tempos de plantio (Tabela 1).

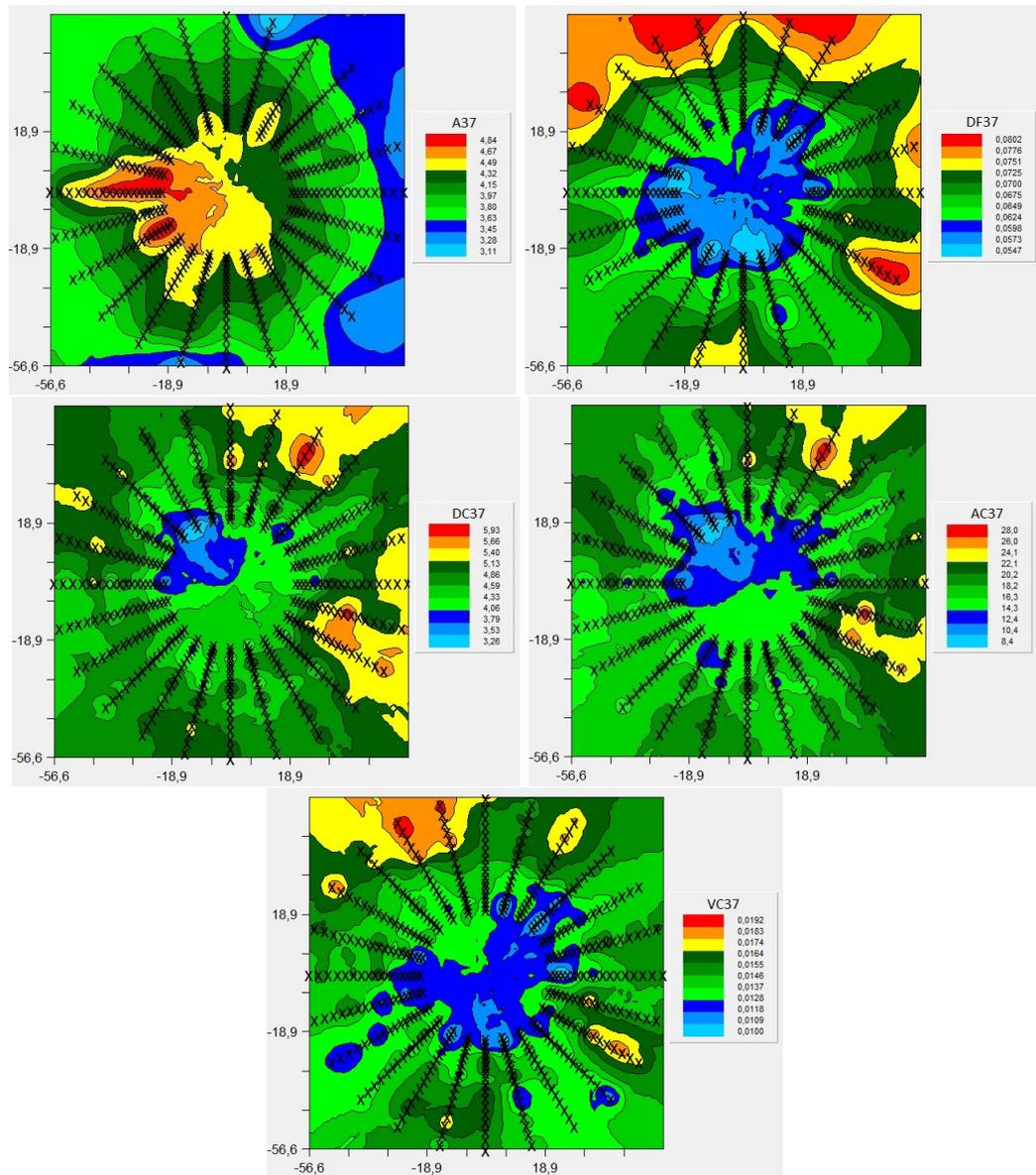


Figura 4: Krigagens das variáveis altura, diâmetro do fuste, diâmetro da copa, área da copa e volume cilíndrico, respectivamente, aos 37 meses após o plantio.

Avaliando a área da copa ( $AC$ ), o efeito pepita ( $C_0$ ) e o patamar ( $C + C_0$ ) aumentaram dos 13 meses para 25 meses e dos 25 meses para 37 meses após o plantio. O alcance ( $A$ ) reduziu de 31,8 m aos 13 meses, para 29,4 m aos 25 meses e para 22,8 m aos 37 meses após o plantio. O avaliador de dependência espacial (ADE) foi forte apenas nos 13 meses, já para 25 e 37 meses após o plantio, o ADE foi mediano (Tabela 1).

O volume cilíndrico (VC) apresentou estimativas dos parâmetros de efeito pepita ( $C_0$ ) e patamar ( $C + C_0$ ) aumentados dos 13 meses para os 25 meses e dos 25 meses para os 37 meses. O alcance aos 13 meses foi de 33,6 m, aumentando para 39,3 m aos 25 meses e reduzindo para 25,5 m aos 37 meses. O avaliador de dependência espacial (ADE) foi forte para todos os tempos após o plantio neste atributo (Tabela 1).

Considerando os valores dos avaliadores de dependência espacial (ADE) obtidos, foi efetuada a krigagem para todas as variáveis. Neste trabalho apresentamos apenas as krigagens para 37 meses (Figura 4). Para a variável altura (A), observou-se que, em todos os tempos após o plantio, as árvores apresentaram maiores valores para posições mais centrais do círculo, ou seja, as árvores apresentaram maior altura para áreas por árvores (APA) menores. Fato justificado pela competição pela luz e pela presença de árvores dominantes, indicando a possibilidade de avaliação de outros atributos como a área da copa iluminada.

Contrariamente à altura (A), para as demais variáveis, houve a tendência de obter valores mais elevados para área por árvore superiores (Figura 4) com a presença de alguns sumidouros e aportes a serem investigados, porém que podem ter sido influenciados por variações no solo e outros efeitos não controlados.

## 4 Conclusões

A análise geoestatística mostrou que há dependência espacial para todas as variáveis, de forma que as alturas tendem a ser maiores para círculos mais centrais, enquanto que as demais variáveis tendem a apresentar valores menores nos círculos mais centrais. Pertencer a um círculo mais central equivale a ter menor área por árvore.

## Referências

- [1] C. A. Cambardella, T. B. Moorman, J. M. Novak, T. B. Parkin, D. L. Karlen, R. F. Turco, and A. E. Konopka, Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils, *Soil Science Society of America Journal*, 58:1501–1511, 1994. DOI:10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.
- [2] W. Köppen. Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra. In *SpringerBriefs in Mathematics*. Fondo de Cultura Económica, México, D.F., 1948.
- [3] F. A. Matos, Relações espaciais e crescimento de Canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) e biomassa de Urochloa brizantha cv. BRS Piatã em sistema silvipastoril, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Grande Dourados, 2014.
- [4] G. Namkoong. Application of Nelder's designs in tree improvement research. In *Proceedings of Southern Conference on Forest Tree Improvement*, Savannah, Georgia, United States, 1965.
- [5] J. A. Nelder. New kinds of systematic designs for spacing experiments, *Biometrics*, 18:283–307, 1962. DOI: 10.2307/2527473.