

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS  
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ESTATÍSTICA E MODELAGEM  
QUANTITATIVA**

**Elódio Sebem**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE FAMÍLIAS BOTÂNICAS EM PARCELA  
DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA E SUAS RELAÇÕES COM  
ARAUCARIACEAE NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS.**

**Santa Maria, RS  
2017**

**Elódio Sebem**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE FAMÍLIAS BOTÂNICAS EM PARCELA DE  
FLORESTA OMBRÓFILA MISTA E SUAS RELAÇÕES COM *ARAUCARIACEAE*  
NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS.**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Especialista em Estatística e Modelagem Quantitativa**.

Orientador: Prof. Dr. Enio Junior Seidel

Santa Maria, RS  
2017

Sebem, Elódio

Distribuição espacial de famílias botânicas em parcela de floresta ombrófila mista e suas relações com *Araucariaceae* na FLONA de São Francisco de Paula, RS. / Elódio Sebem. - 2017.

90 p.; 30cm

Orientador: Enio Junior Seidel

Monografia (Especialização) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa, RS, 2017

1. Processo Pontual 2. Geoestatística 3. K de Ripley 4. Álgebra de Mapas 5. Semivariograma I. Seidel, Enio Junior II. Título.

---

©2017

Todos os direitos autorais reservados a Elódio Sebem. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Caixa Postal 2051, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP 97110-970

Fone: (0xx) 55 99614 8081; E-mail: elodiosebem@politecnico.ufsm.br


Elódio Sebem

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE FAMÍLIAS BOTÂNICAS EM PARCELA DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA E SUAS RELAÇÕES COM ARAUCARIACEAE NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS.**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Estatística e Modelagem Quantitativa, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Especialista em Estatística e Modelagem Quantitativa**.

Aprovado em 25 de agosto de 2017.

  
Enio Junio Seidel, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

  
Ana Lucia Souza Silva Mateus, Dr<sup>a</sup>. (UFSM)

  
Lúcio de Paula Amaral, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS  
2017

*“Habituai-vos a obedecer, para aprender a mandar.  
Costumai-vos a ouvir, para alcançar a entender.  
Afazei-vos a esperar, para lograr concluir.  
Não delireis nos vossos triunfos.  
Para não arrefecerdes, imaginai que podeis vir a saber tudo; para não presumirdes,  
refleti que, por muito que souberdes, mui pouco tereis chegado a saber.  
Sede, sobretudo, tenazes, quando o objeto almejado se vos furtar na obscuridade  
avara do ignoto.  
Profundai a escavação, incansáveis como o mineiro no garimpo.  
De um momento para outro, no filão resistente se descobrirá, talvez, por entre a  
ganga, o metal precioso.”*

“Discurso no Colégio Anchieta, Palavras à Juventude”(1903)  
Rui Barbosa (1849-1923)

## **AGRADECIMENTOS**

Meu profundo agradecimento a todas as pessoas que me ajudaram na elaboração desta monografia de especialização e em especial:

Ao Prof. Enio Junior Seidel que gentilmente me orientou neste trabalho e permitiu em nossas discussões observar que ainda não esgotamos o assunto e teremos muito por fazer.

Aos Professores Lúcio de Paula Amaral, Ana Lucia Souza Silva Mateus e Augusto Maciel da Silva que gentilmente aceitaram o convite de ler este manuscrito e emitir suas opiniões para a sua melhoria, sem esquecer-me de fazer menção especial ao Professor Lúcio que colaborou na coleta de dados e em diversas discussões sobre geoestatística.

Aos Colegas do Departamento de Estatística do Centro de Ciências Naturais e Exatas que foram meus professores nas disciplinas do curso e em especial a Adriano Mendonça Souza, Anaelena Bragança de Moraes, Ana Lucia Souza Silva Mateus, Angela Pelegrin Ansuji, Fernando de Jesus Moreira Junior, Luciane Flores Jacobi e Roselaine Ruviano Zanini.

Aos colegas de turma que me ajudaram nos trabalhos e na compreensão dos meandros na estatística durante as aulas de 2016.

Aos meus bolsistas Marcos Augusto Gomes dos Santos e Letícia Daiane Pedrali que me auxiliaram na coleta de dados e elaboração desta monografia.

Ao Professor Solon Jonas Longhi que gentilmente disponibilizou os dados obtidos durante os inventários florestais de 2000 a 2009 na FLONA de São Francisco de Paula, RS.

A minha família, que nesta lista vem no último parágrafo, mas que é a parte mais importante de minha vida. Muito obrigado Michele Monguilhott por aguentar-me nos bons e maus momentos. Muito obrigado Enzo e Davi por não entenderem muito bem o porquê de o pai ter que trabalhar, mas que enchem meus dias de felicidades.

## RESUMO

# DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE FAMÍLIAS BOTÂNICAS EM PARCELA DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA E SUAS RELAÇÕES COM *ARAUCARIACEAE* NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS.

AUTOR: Elódio Sebem

ORIENTADOR: Enio Junior Seidel

Os objetivos deste trabalho foram analisar a distribuição espacial das famílias botânicas mais abundantes em área de Floresta Ombrófila Mista e suas relações com as *Araucariaceae*, na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS. Para isso, utilizou-se a posição espacial das árvores medidas no Inventário Florestal realizado em parcela de 1ha (100 x 100 m) nos anos de 2001 e 2017, por meio de da função K de Ripley e geoestatística. A distribuição espacial das *Aquifoliaceae*, *Euphorbiaceae*, *Lauraceae*, *Myrtaceae* e *Sapindaceae* foi agregado e das *Araucariaceae* e *Flacourtiaceae* predominou o padrão completamente aleatório nas duas datas analisadas. As *Araucariaceae* demonstraram ter padrão associado na distribuição espacial com as famílias botânicas *Aquifoliaceae*, *Lauraceae* e *Myrtaceae* (a partir de 20m aproximadamente), enquanto que o padrão de completa independência espacial foi observado com as famílias *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* e *Sapindaceae*. A Geoestatística, refletiu o padrão de associação do processo pontual bivariado para a relação entre as *Araucariaceae* e as *Aquifoliaceae* e entre as *Araucariaceae* e as *Lauraceae*, nas duas datas estudadas. Não se observou o mesmo comportamento do processo pontual bivariado para a relação das *Araucariaceae* e as *Myrtaceae*. As *Araucariaceae* e as *Flacourtiaceae* obtiveram ajuste variográfico satisfatório nos anos de estudo, discordando com o processo pontual marcado de completa independência espacial na maioria das distâncias de análise. As *Araucariaceae* e as *Euphorbiaceae* tiveram bom ajuste variográfico para o ano de 2001 e de baixa qualidade em 2017, enquanto que a relação entre *Araucariaceae* e *Sapindaceae*, dada pela variável de trabalho não permitiu encontrar estabilidade na semivariância nos anos de estudo. Observou-se que apenas 30,47% da parcela não sofreu alterações na distribuição espacial dos indivíduos das famílias botânicas estudadas entre os anos de estudo. A saída de árvores modificou em maior grau a relação entre as *Araucariaceae* e as famílias *Aquifoliaceae*, *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* e *Myrtaceae*, enquanto que o ingresso de árvores produziu maiores mudanças na relação entre *Araucariaceae* e *Lauraceae* e entre *Araucariaceae* e *Sapindaceae*.

Palavras-chave: Processo Pontual, Geoestatística, K de Ripley, Álgebra de Mapas, Semivariograma.

## ABSTRACT

# SPATIAL DISTRIBUTION OF BOTANICAL FAMILIES IN MIXED OMBROPHILOUS FOREST AND THEIR RELATIONSHIPS WITH *ARAUCARIACEAE* IN FLONA, SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS.

AUTHOR: Elódio Sebem  
ADVISER: Enio Junio Seidel

The aims of this work were to analyze the spatial distribution of the most abundant botanical families in the area of Araucaria Forest and its relations with the *Araucariaceae*, in the National Forest of São Francisco de Paula, RS. For this purpose, the spatial position of the trees measured in the Forest Inventory carried out in a 1 ha plot (100 x 100 m) in the years of 2001 and 2017 was used, by the Ripley K function and geostatistics. The spatial distribution of the *Aquifoliaceae*, *Euphorbiaceae*, *Lauraceae*, *Myrtaceae* and *Sapindaceae* was aggregated and of the *Araucariaceae* and *Flacourtiaceae* the completely random pattern predominated in the two dates analyzed. *Araucariaceae* have been shown to have an associated spatial distribution with the botanical families *Aquifoliaceae*, *Lauraceae* and *Myrtaceae* (from approximately 20m), while the pattern of complete spatial independence was observed with the families *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* and *Sapindaceae*. Geostatistics, reflected the association pattern of the bivariate point process for the relationship between the *Araucariaceae* and the *Aquifoliaceae* and between the *Araucariaceae* and the *Lauraceae*, in the two dates studied. The same behavior of the bivariate point process was not observed for the relation of *Araucariaceae* and *Myrtaceae*. *Araucariaceae* and *Flacourtiaceae* obtained satisfactory variographic adjustment in the study years, disagreeing with the marked point process of complete spatial independence at most of the analysis distances. *Araucariaceae* and *Euphorbiaceae* had good variographic adjustment for the year 2001 and low quality in 2017, while the relationship between *Araucariaceae* and *Sapindaceae*, given by the labor variable did not allow to find stability in the semivariance in the years of study. It was observed that only 30.47% of the plot did not suffer alterations in the spatial distribution of the individuals of the botanical families studied between the years of study. The removal of trees modified to a greater degree the relationship between the *Araucariaceae* and the families *Aquifoliaceae*, *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* and *Myrtaceae*, while the entry of trees produced greater changes in the relationship between *Araucariaceae* and *Lauraceae* and between *Araucariaceae* and *Sapindaceae*.

Keywords: Timing Process, Geostatistics, Ripley's K, Map Algebra, Semivariogram.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de padrão de distribuição espacial: aleatório (a), regular (b) e agrupado (c).....	21
Figura 2 - Semivariograma experimental e modelo matemático ajustado.....	24
Figura 3 – Imagem de detecção de mudanças por diferença entre os valores encontrados nas duas datas de análise.....	31
Figura 4 - Área de Estudo.....	32
Figura 5 – Banco de dados para realizar o processo pontual marcado.....	34
Figura 6 – Procedimento para obtenção da variável de trabalho.....	35
Figura 7 - Seleção de famílias por atributos.....	36
Figura 8 - União espacial da árvore mais próxima da família <i>Aquifoliaceae</i> e as <i>Araucariaceae</i> na parcela 1539 em 2001.....	37
Figura 9 – Banco de dados para realizar os processos de interpolação espacial.....	38
Figura 10 – Álgebra de Mapas entre a data atual e a data antiga.....	40
Figura 11 - Distribuição espacial das árvores medidas na parcela 1539 em 2001...	41
Figura 12 - Função K de Ripley e envelope de simulação, para a distribuição espacial, das famílias botânicas na parcela 1539 em 2001.....	44
Figura 13 - Função K de Ripley e envelope de simulação, para associação espacial entre as <i>Araucariaceae</i> e as demais famílias botânicas na parcela 1539 em 2001..	45
Figura 14 - Distribuição espacial dos quartis da variável distância (m) da árvore mais próxima de cada <i>Araucariaceae</i> por família botânica na parcela 1539 em 2001.....	47
Figura 15 - Gráfico box plot para os dados obtidos na parcela 1539 em 2001.....	48
Figura 16 - Envelopes de dependência espacial para as famílias em estudo na parcela 1539 em 2001, utilizando 90% da distância máxima entre as árvores.....	49
Figura 17 - Modelos teóricos ajustados para os dados da parcela 1539 em 2001...	51
Figura 18 - Interpolação espacial por krigagem ordinária para a distância entre as famílias botânicas e as <i>Araucariaceae</i> na parcela 1539 em 2001.....	54
Figura 19 - Distribuição espacial das árvores medidas na parcela 1539 em 2017...	56
Figura 20 - Função K de Ripley e envelope de simulação, para a distribuição espacial, das famílias botânicas na parcela 1539 em 2017.....	59
Figura 21 - Função K de Ripley e envelope de simulação, para associação espacial entre as <i>Araucariaceae</i> e as demais famílias botânicas na parcela 1539 em 2017..	60
Figura 22 - Distribuição espacial dos quartis da variável distância (m) da árvore mais próxima de cada <i>Araucariaceae</i> por família botânica na parcela 1539 em 2017.....	62
Figura 23 - Gráfico box plot para os dados obtidos na parcela 1539 em 2017.....	63
Figura 24 - Envelopes de dependência espacial para as famílias em estudo na parcela 1539 em 2017, utilizando 90% da distância máxima entre as árvores.....	64
Figura 25 - Modelos teóricos ajustados para os dados da parcela 1539 em 2017...	66
Figura 26 - Interpolação espacial por krigagem ordinária pontual para a distância entre as famílias botânicas e as <i>Araucariaceae</i> na parcela 1539 em 2017.....	70

Figura 27 - Interpolação espacial por krigagem ordinária pontual para a distância entre as famílias botânicas e as <i>Araucariaceae</i> na parcela 1539 em 2017.....	72
Figura 28 – Localização das mudanças na distribuição espacial dos indivíduos entre os anos de 2001 e 2017 na parcela 1539 da FLONA.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do Índice de Dependência Espacial proposta por Seidel e Oliveira (2016).....	26
Tabela 2 – Classificação das mudanças nos padrões de distribuição espacial.....	40
Tabela 3 – Principais estatísticas das árvores medidas na parcela 1359 em 2001..	42
Tabela 4 - Estatísticas descritivas dos valores de distância das árvores mais próximas às <i>Araucariaceae</i> na parcela 1539 em 2001.....	46
Tabela 5 - Número de pares utilizados para calcular o semivariograma em 2001....	48
Tabela 6 - Ajustes dos Modelos Teóricos aos semivariogramas empíricos para cada família em análise na parcela 1539 em 2001.....	50
Tabela 7 - Estatísticas de Validação Cruzada dos dados Originais X Preditos para os modelos teóricos ajustados para a parcela 1539 em 2001.....	52
Tabela 8 – Limites das classes utilizados nos mapas obtidos por krigagem ordinária pontual para a variável de estudo na parcela 1539 em 2001.....	53
Tabela 9 – Estatísticas descritivas dos valores de distância das árvores mais próximas às <i>Araucariaceae</i> obtidos por krigagem ordinária na parcela 1539 em 2001.....	55
Tabela 10 – Quadro de áreas das krigagens de 2001 na parcela 1539.....	55
Tabela 11 – Principais estatísticas das árvores medidas na parcela 1539 em 2017.	57
Tabela 12 - Estatística descritiva dos valores de distância das árvores mais próximas às <i>Araucariaceae</i> na parcela 1539 em 2017.....	61
Tabela 13 - Número de pares utilizados para calcular o semivariograma em 2017.	64
Tabela 14 - Ajustes dos Modelos Teóricos aos semivariogramas empíricos para cada família em análise na parcela 1539 em 2017.....	65
Tabela 15 - Estatísticas de Validação Cruzada dos dados Originais X Preditos para os modelos teóricos ajustados para a parcela 1539 em 2017.....	67
Tabela 16 – Limites das classes de distância (m) utilizados nos mapas obtidos por krigagem ordinária pontual para a variável de estudo na parcela 1539 em 2017.....	69
Tabela 17 – Estatísticas descritivas dos valores de distância (m) das árvores mais próximas às <i>Araucariaceae</i> obtidos por krigagem ordinária na parcela 1539 em 2017.....	69
Tabela 18 – Quadro de áreas das krigagens de 2017 na parcela 1539.....	71
Tabela 19 – Classes de fatiamento para cada família botânica analisada.....	71
Tabela 20 – Quadro de áreas para as imagens $IAE_{FBi}$ .....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Alcance (m)
AB	Área Basal (m <sup>2</sup> )
AP	Agricultura de Precisão
Aqui	Família Botânica <i>Aquifoliaceae</i>
Arauc	Família Botânica <i>Araucariaceae</i>
Árv	Árvore
C0	Efeito Pepita
C0+C1	Patamar
C1	Contribuição ou Variação Estrutural
CAE	Completa Aleatoriedade Espacial
CAP	Circunferência a Altura do Peito (1,30 m)
CIE	Completa Independência Espacial
DA	Densidade Absoluta
DE	Dependência Espacial
DP <sub>EM</sub>	Desvio Padrão dos Erros
EA	Erro Absoluto
EM	Média do Erro
Euph	Família Botânica <i>Euphorbiaceae</i>
$\bar{ER}$	Erro Médio Reduzido
Exp	Modelo Teórico Exponencial
Flac	Família Botânica <i>Flacourtiaceae</i>
FLONA	Floresta Nacional
FLONA-SFP	Floresta Nacional de São Francisco de Paula
FOM	Floresta Ombrófila Mista
Gaus	Modelo Teórico Gaussiano
IDE	Índice de Dependência Espacial
IFC	Inventário Florestal Contínuo
Laur	Família Botânica <i>Lauraceae</i>
Myrt	Família Botânica <i>Myrtaceae</i>
N	Número de Indivíduos
ND	Nível Digital
PR	Paraná
R <sup>2</sup>	Coefficiente de Determinação
R <sup>2</sup> Adj.	Coefficiente de Determinação Ajustado
RS	Rio Grande do Sul
Sap	Família Botânica <i>Sapindaceae</i>
S <sub>ER</sub>	Desvio Padrão dos Erros Reduzidos
SP	Silvicultura de Precisão
Sph	Modelo Teórico Esférico
SQ	Soma de Quadrados
UTM	Universo Transverso de Mercator
VI%	Valor de Importância em Porcentagem

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Floresta Ombrófila Mista (FOM).....	16
2.2 Padrões de Distribuição Espacial.....	20
2.2.1 Processo Pontual.....	20
2.2.2 Geoestatística.....	22
2.3 Krigagem Ordinária Pontual.....	28
2.4 Análise Temporal.....	29
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1 Área de Estudo.....	32
3.2 Inventário Florestal.....	33
3.2 Processo Pontual.....	33
3.2 Obtenção da Variável de Trabalho.....	34
3.4 Interpolação Espacial.....	38
3.5 Dinâmica Espacial.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1 Análise dos dados obtidos no Inventário Florestal de 2001.....	41
4.1.1 Distribuição Espacial das Árvores Medidas.....	41
4.1.2 Processo Pontual.....	43
4.1.3 Análise Espacial por Geoestatística.....	45
4.1.3.1 Estatística Descritiva dos dados de 2001.....	46
4.1.3.2 Análise Semivariográfica.....	48
4.1.3.3 Ajustes dos Modelos Teóricos ao Semivariograma Experimental.....	49
4.1.3.4 Interpolação espacial por krigagem ordinária pontual.....	53
4.2 Análise dos dados obtidos no Inventário Florestal de 2017.....	56
4.2.1 Distribuição Espacial das Árvores Medidas.....	56
4.2.2 Processo Pontual.....	58
4.2.3 Análise Espacial por Geoestatística.....	61
4.2.3.1 Estatística Descritiva dos dados de 2017.....	61
4.2.3.2 Análise Semivariográfica.....	63
4.2.3.3 Ajustes dos Modelos Teóricos ao Semivariograma Experimental.....	65
4.2.3.4 Interpolação espacial por krigagem ordinária pontual.....	68

4.3 Análise das mudanças na distribuição espacial das famílias botânicas.....	71
5 CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
APÊNDICES	

## 1 INTRODUÇÃO

Fenômenos naturais apresentam-se frequentemente com certa estruturação nas variações entre vizinhos, denominada de condicionamento espacial. Desta forma, pode-se dizer que as variações não são aleatórias e, portanto, apresentam algum grau de dependência espacial, ou seja, observações vizinhas exercem influências umas sobre as outras (AMARAL et al., 2013).

As informações obtidas pela Agricultura de Precisão (AP) se constituem em parâmetros para definição de estratégias de manejo que levam em consideração essas diferenças espaciais e temporais (CASS, 2013). Neste contexto, a Silvicultura de Precisão (SP) representa uma nova forma de administração das florestas (AMORIM et al., 2013). Assim, a SP baseia-se na coleta e análise de dados geoespaciais e viabiliza intervenções localizadas nas florestas naturais, com exatidão e precisão adequadas (SEBEM, 2016).

O estudo de distribuição espacial de espécies arbóreas é uma das ferramentas de grande importância, pois a variabilidade espacial das mesmas pode ser utilizada para auxiliar no seu manejo sustentável. A distribuição espacial das espécies e de seus indivíduos é consequência da união de fatores bióticos e abióticos que regem a ação dos processos ecológicos na floresta (SILVA et al., 2008).

A Floresta Ombrófila Mista (FOM) ou Floresta com Araucária é uma das mais importantes formações florestais dos Planaltos Sul Brasileiros, ocorrendo nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Tem por característica a interpretação de floras de origem austral-andina e tropical afro-brasileira (VELOSO et al., 1991), sendo que a espécie que mais se destaca é a *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, por sua abundância, porte e copas corimbiformes, que conferem a esta formação florestal um aspecto próprio (AMARAL, 2014).

A exploração intensiva de madeiras de grande valor econômico de espécies como *Araucaria angustifolia* (pinheiro brasileiro), *Ocotea porosa* (imbuia), *Luehea divaricata* (açoita-cavalo) e *Cedrela fissilis* (cedro) reduziu suas reservas naturais, o que, aliado a falta de estudos sobre a demografia e dinâmica na comunidade, colocam as populações residuais em grande perigo (AMARAL, 2014).

A área coberta pela FOM no RS, no início da década de 2000, era de 9.195,65 km<sup>2</sup> (919.565,00 ha), e representava 18,64% da área coberta por florestas naturais (RIO GRANDE DO SUL, 2002). A FOM no RS, como observa Nascimento et al. (2001) apresenta hoje graves problemas decorrentes das atividades antrópicas, como por exemplo exploração de espécies madeireiras com valor econômico elevado, extrativismos (pinhão, erva-mate, xaxim, entre outros), expansão da agricultura e pecuária, crescimento das cidades, entre outros fatores, aumentando a importância de se ter um melhor entendimento e compreensão sobre a floresta, para melhor utilizá-la e/ou conservá-la.

A hipótese que guia este trabalho é que as florestas apresentam-se estruturadas espacialmente, e que suas variáveis podem ser consideradas variáveis regionalizadas. Assim, com a utilização de dados amostrais georreferenciados, acredita-se que os processos pontuais e a geoestatística possibilitam descrever o comportamento da floresta.

Justifica-se a realização deste trabalho porque o conhecimento das relações espaciais entre os indivíduos existentes na floresta possibilitam a proposição de planos de manejo florestal que garantam a diversidade biológica e a obtenção de produtos florestais respeitando o meio ambiente.

O objetivo geral deste trabalho é: 1) analisar a distribuição espacial das famílias botânicas mais abundantes em área de FOM; e 2) verificar suas relações com as *Araucariaceae*, por meio de processos pontuais e geoestatística.

Os objetivos específicos são:

- 1) Determinar a distribuição espacial das árvores medidas no inventário florestal por processos pontuais;
- 2) Determinar a distribuição espacial das árvores medidas no inventário florestal por geoestatística;
- 3) Inferir sobre as mudanças ocorridas na área de estudo entre os levantamentos realizados em 2001 e 2017.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Floresta Ombrófila Mista (FOM)

A Floresta Ombrófila Mista (FOM) ocorre exclusivamente no Planalto Meridional Brasileiro e em algumas áreas isoladas nas partes elevadas da Serra do Mar e da Serra da Mantiqueira (MIRA-SERRA, 2012). No Rio Grande do Sul, ocorrem em altitudes entre 500 m ao oeste a 1.000 m a leste, onde se destacam três núcleos principais: na borda dos Aparados entre os rios Maquiné e das Antas, na borda da encosta sul do Planalto, entre os rios Taquari e dos Sinos e em pleno Planalto Central, no curso superior do rio Jacuí (IBGE, 2012).

A FOM caracterizada por apresentar o estrato superior dominado pela *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, que dá à paisagem uma fisionomia própria. O estrato inferior é constituído por árvores mais baixas ou arbustos arborescentes, pertencente em grande parte às Mirtáceas, sendo comum a casca d'anta (*Drymis brasiliensis*) e o pinheiro bravo (*Podocarpus lambertii*) (IBGE, 2012).

A *Araucaria angustifolia*, conhecida popularmente como pinheiro-brasileiro, pinheiro do paraná, araucária ou pinheiro, pertence à família *Araucariaceae* que, segundo Marchiori (2005) compreende 2 gêneros e cerca de 32 espécies, originárias da Oceania e América do Sul. O gênero *Araucaria* Juss. reúne um menor número de espécies, mas possui distribuição mais ampla, incluindo o sul da América (Planalto Brasileiro e Andes Austrais) e a Oceania.

Trabalhos realizados em remanescentes de FOM, como por exemplo o de Nascimento et al. (2001), em Nova Prata (RS), indicam que as famílias *Myrtaceae*, *Lauraceae*, *Flacourtiaceae* e *Rutaceae* apresentam as maiores riquezas em espécies e destacam-se na estrutura e fisionomia do dossel da floresta. O trabalho de Narvaes et al. (2005) realizado na Floresta Nacional de São Francisco de Paula (RS), trouxe como resultado que a família mais representativa na área do estudo foi a *Myrtaceae*, com 21 espécies, seguida de *Solanaceae*, *Lauraceae*, *Asteraceae*, *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* e *Rutaceae*.

O estudo, realizado por Silvestre et al. (2012) em um fragmento de FOM, no município de Guarapuava (PR), mostra que espécies endêmicas da Floresta Ombrófila Mista como *Araucaria angustifolia*, *Cinnamodendron dinisii* e *Ilex*

*paraguariensis*, fazem parte da comunidade estudada e apresentaram-se com padrão de distribuição agregado. Também apresentaram padrão de distribuição agregada, outras espécies importantes da Floresta Ombrófila Mista, como *Clethra scabra*, *Cupania vernalis*, *Drimys brasiliensis*, *Luehea divaricata*, *Matayba elaeagnoides*, *Prunus brasiliensis*.

Outro exemplo, realizado em Santa Catarina por Higuchi et al. (2013), indica as famílias *Myrtaceae*, *Solanaceae*, *Asteraceae*, *Aquifoliaceae*, *Lauraceae* e *Solanaceae* como as de maior riqueza, com predominância de espécies dos gêneros *Myrceugenia*, *Solanum*, *Baccharis* e *Ilex*. A diversidade foi baixa e a dominância alta, com dominância ecológica de *Araucaria angustifolia* no dossel superior e de *Myrceugenia euosma* no dossel inferior.

Mesmo sendo uma espécie característica da Floresta Ombrófila Mista, alguns estudos indicam sua baixa riqueza, como por exemplo o de Narvaes et al. (2005) onde a *Araucaria angustifolia* apresentou baixa regeneração natural, caracterizado pelos valores inexpressivos dos parâmetros fitossociológicos.

Já a família *Myrtaceae* possui distribuição predominantemente pantropical e subtropical, concentrada na região neotropical e na Austrália. A família inclui cerca de 130 gêneros e 4000 espécies, representando uma das maiores famílias da flora brasileira, com 26 gêneros e aproximadamente 1000 espécies. Na flora brasileira, as *Myrtaceae* aparecem entre as famílias mais comuns na maioria das formações vegetais, com destaque para a Floresta Atlântica e para a Floresta de Restinga, onde espécies de *Eugenia*, *Marlierea*, *Gomidesia*, *Myrcia* e outros gêneros são muito comuns, representando frequentemente a família com maior número de espécies (SOUZA e LORENZI, 2008).

O trabalho de Nascimento et al. (2001), na Floresta Nacional de São Francisco de Paula (RS), mostrou que espécies da família *Myrtaceae* tais como camboim (*Syphoneugenia reitzii* e *Myrciaria delicatula*), além de guaçatunga-branca (*Banara tomentosa*), são fortemente agregadas, apresentando alta Razão Variância/Média.

A família *Aquifoliaceae* caracteriza-se por ser uma família de arbustos ou árvores. É uma família cosmopolita, incluindo um único gênero, *Ilex*, com aproximadamente 400 espécies, das quais, cerca de 50 ocorrem no Brasil, principalmente nos estados do Sul e Sudeste e em áreas de maior altitude (SOUZA e LORENZI, 2008). No entanto, uma de suas espécies possui relevante valor

econômico, a erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.), que é característica da Floresta com Araucária (SIGNOR et al., 2015). Segundo Moran et al. (2016) a espécie *I. paraguariensis*, na FOM, apresenta boa associação com a *Araucaria angustifolia*.

A família *Lauraceae* é considerada uma das famílias mais primitivas e das mais complexas do ponto de vista taxonômico, pertencente à divisão *Magnoliophyta*, possui distribuição tropical e subtropical, concentrada em florestas pluviais da Ásia e Américas, isso inclui cerca de 50 gêneros e 2500 espécies, sendo que no Brasil ocorrem cerca de 22 gêneros e cerca de 400 espécies (SOUZA e LORENZI, 2008).

As Lauracea representam uma das famílias de mais destaque na composição florística de grande parte dos ecossistemas florestais do país, em especial da Mata Atlântica e em florestas da Região Sul. Nestes ecossistemas é frequentemente uma das famílias mais representadas, tanto em número de espécies quanto de indivíduos (SOUZA e LORENZI, 2008). Muitas espécies da família *Lauraceae* estão entre as mais comuns na estrutura da Floresta com Araucária, compondo o dossel e o subdossel desta. Muitas dessas espécies possuem bom potencial silvicultural, usos variados e valor econômico (CANALEZ et al., 2006).

O estudo de Canalez et al. (2006), realizado em um fragmento de FOM no estado do Paraná, quanto à dinâmica da estrutura das *Lauraceae*, traz como resultado do índice de Morisita (cálculo que demonstra se a espécies apresentam padrões de distribuição agregada ou não), valores entre 1,1 e 3,9, indicando que todas as espécies apresentaram padrão de distribuição agregada. Ainda, segundo o autor, no caso do pau-alho (*Cinnamomum vesiculosum* (Nees & Kosterm) e da canela-amarela (*Nectandra grandiflora* Nees & Mart. ex Nees) os resultados foram bem próximos a 1, indicando, portanto, uma distribuição mais próxima da aleatória do que da agregada.

A família *Sapindaceae*, é uma família cosmopolita, com cerca de 145 gêneros e aproximadamente 2000 espécies, em sua maioria tropicais ou subtropicais. Na América ocorrem 38 gêneros, dos quais 33 são exclusivos deste continente. São árvores, arbustos, subarbustos eretos ou decumbentes, lianas, trepadeiras herbáceas ou raro ervas, monoicas, raro dioicas, lactescentes ou não (SOMMER, 2009).

O levantamento fitossociológico de Hack et al. (2005), realizado em um fragmento de Floresta Estacional Decidual no município de Jaguari – RS, indicou a

família *Sapindaceae* com o maior número de indivíduos, representando 16,5% do total de indivíduos amostrados, sendo a espécie *Cupania vernalis* responsável pelo domínio desta família, com 62 indivíduos, representando 10,47% do total de indivíduos amostrados.

A família *Euphorbiaceae*, também facilmente encontrada em FOM, caracteriza-se por ser compostas de ervas, arbustos, árvores ou lianas. Possui distribuição predominantemente pantropical, incluindo cerca de 300 gêneros e 6000 espécies. No Brasil ocorrem cerca de 70 gêneros e 1000 espécies, representando uma das principais famílias da flora brasileira e uma das mais complexas do ponto de vista taxonômico. (SOUZA e LORENZI, 2008).

Quanto à família *Flacourtiaceae* não existe consenso quanto à organização taxonômica, na literatura o assunto é pouco enfatizado, pois são escassos os trabalhos de revisão taxonômica realizados, diversos autores ressaltam a íntima relação de seus representantes com os representantes da família *Salicaceae* (THADEO et al., 2007). Para a família *Flacourtiaceae*, no Brasil são mencionados 19 gêneros e, aproximadamente 92 espécies (BARROSO et al., 2002) apud (THADEO et al., 2007).

O trabalho de Narvaes et al. (2005), quanto a composição florística da regeneração em FOM, traz em seus resultados que uma espécie de *Flacourtiaceae* possui a maior densidade absoluta (DA, número de indivíduos por hectare), sendo ela *Casearia decandra*, com DA = 1107,22 e VI%=11,68 (VI% = Valor de Importância, Soma da Densidade Relativa, Frequência Relativa e Dominância Relativa da Espécie Florestal). Em seguida aparecem duas espécies de *Euphorbiaceae*, *Stillingia oppositifolia* Baill. exMüll. Arg., com DA= 1456,11 e VI%= 10,31 e *Sebastiania brasiliensis* Spreng. com DA= 851,67 e VI%= 9,82.

Essas três espécies citadas perfizeram 31,81% do valor de importância total. Apesar de serem bastante representativas na regeneração, não possuem interesse econômico, apenas ecológico. Os altos valores de importância de *Casearia decandra*, *Stillingia oppositifolia* e *Sebastiania brasiliensis* encontrados provaram que tais espécies são as mais características da regeneração natural na área estudada, sendo importantes para o processo de sucessão ecológica, criando condições para que as espécies de estágios sucessionais mais avançados se estabeleçam (NARVAES et al., 2005).

## 2.2 Padrões de Distribuição Espacial

Os métodos de análise espacial em ciências florestais, segundo Anjos et al. (2004), tem grande aplicação no estudo da distribuição espacial das árvores principalmente daquelas no seu ambiente natural, podendo fornecer informações sobre a ecologia, subsidiar a definição de estratégias de manejo e/ou conservação, auxiliar nos processos de amostragem ou simplesmente esclarecer sobre a estrutura espacial de uma espécie.

Existem inúmeras metodologias criadas ou desenvolvidas para se fazer a análise de um padrão de distribuição espacial (ANJOS et al., 2004), incluindo os métodos para processos pontuais, as técnicas geoestatísticas e as abordagens de dados de área (SCHABENBERGER e GOTWAY, 2005).

### 2.2.1 Processo Pontual

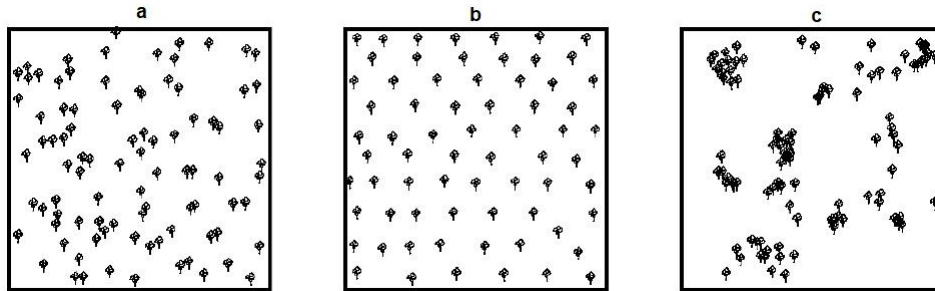
O Processo Pontual pode ser dividido em: sem marca, com marca numérica (quantitativa), ou com marca categórica (qualitativa).

O Processo Pontual sem marca permite a definição do arranjo espacial de determinada variável e de acordo com Begon et al. (2006) podemos reconhecer três padrões principais de dispersão: aleatório (ocorre quando existe uma probabilidade igual de um organismo ocupar qualquer ponto no espaço, independentemente da posição de qualquer outro); regular (também chamada de distribuição uniforme, ocorre quando um indivíduo tem uma tendência para evitar outros indivíduos, e o resultado é que os indivíduos estão mais uniformemente espaçados do que o esperado por acaso); e agregada (também chamada de distribuição contagiosa ou agrupada, que ocorre ou quando os indivíduos tendem a ser atraídos para, ou são mais propensos a sobreviver em partes específicas do ambiente, ou quando a presença de um indivíduo atrai ou dá origem a um outro perto dele, o resultado é que indivíduos estão mais próximos do que o esperado por acaso). A Figura 1 mostra exemplos de padrões de distribuição espacial.

As funções comumente utilizadas nos Processos Pontuais são:  $K$  (RIPLEY, 1977, 1981) e  $L$  (função  $K$  transformada) (DALMASO et al., 2012). Para essas funções a hipótese nula ( $H_0$ ) é de Completa Aleatoriedade Espacial (CAE), na

função univariada, sem marca (BATISTA, 1994) e com marca categórica, a hipótese nula testada é de Completa Independência Espacial (CIE).

Figura 1 – Exemplos de padrão de distribuição espacial: aleatório (a), regular (b) e agrupado (c).



Fonte: Dalmaso et al. (2012).

A função  $K(h)$  é uma função de densidade de probabilidade que considera a variância de todas as distâncias entre todos os eventos do espaço amostral (MOEUR, 1993; HAASE, 1995). A função calcula todas as distâncias entre os pontos amostrais na área de estudo, onde um círculo de raio  $h$  é centrado em cada evento e o número de pontos amostrais dentro deste círculo é contado (ANJOS et al., 2004). Variando o raio de busca é possível detectar o padrão espacial em diferentes escalas (CAPRETZ et al., 2012).

Com a utilização da simulação é possível testar o padrão de distribuição. Sob CIE e CAE é esperado que os valores posicionem-se dentro dos envelopes de simulação (limites de rejeição para o teste) e a função estimada é comparada com a função teórica sob a hipótese nula. Capretz et al., (2012) comenta que se os valores observados estiverem dentro dos envelopes construídos, o padrão espacial é aleatório e; para valores fora dos envelopes rejeita-se a hipótese nula.

O envelope de confiança é construído estimando a função  $K$  sob padrão de aleatoriedade espacial completa (sem marca) ou sob completa independência espacial (com marca), para várias realizações desse processo em um polígono de mesma forma e tamanho que o observado nos dados, com número de pontos sendo o observado nos dados (KRAINSKI e RIBEIRO JR., 2006).

Para o cálculo da Função  $K$  foi empregado o estimador da função com a correção proposta por Ripley segundo a equação (1) (RIPLEY, 1977), conforme Severiano (2015).

$$\hat{K}(h) = \frac{1}{\hat{\lambda}n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_I^{-1}(x_i, x_j) I(\|x_i - x_j\| < h), \text{ para } i \neq j \text{ e } h > 0 \quad (1)$$

Onde,  $n$  = é o número de árvores na região de estudo;  $x_i$  e  $x_j$  = coordenadas dos pontos;  $\|x_i - x_j\|$  = distância euclidiana entre as localizações  $x_i$  e  $x_j$ ;  $h$  = vetor arbitrário de distâncias;  $\hat{\lambda} = n/|A|$  = número de árvores dividido pela área da região de estudos, sendo um estimador não viciado de intensidade do processo;  $w_I^{-1}(x_i, x_j)$  = vetor de correção para o efeito de borda;  $I(U)$  = função indicadora que assume o valor 1 (um) sempre que a condição  $U$  for verdadeira, e zero quando a condição for falsa.

Nos Processos Pontuais Marcados se espera as seguintes respostas da interação entre os eventos: dissociação, associação, e aleatoriedade (ausência de associação positiva ou negativa), sendo que, a interpretação das interações, de duas categorias (i e j) proposta por Higuchi et al. (2011) é: segregados, dissociados ou inibitórios (quando o número de indivíduos da categoria (j) for menor em torno da categoria (i) quando comparado ao aleatório), ou seja, apresenta interação negativa, repulsão; e associados ou agregados (quando o número de indivíduos da categoria (j) tiver em excesso em torno da categoria (i) quando comparado ao aleatório), ou seja, apresentam interação positiva.

### 2.2.2 Geoestatística

A Geoestatística trata do estudo das variáveis regionalizadas (YAMAMOTO e LANDIM, 2013), ou seja, variáveis com condicionamento espacial, com componente estrutural, mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e aquelas totalmente determinísticas (VIEIRA, 1998, ANDRIOTTI, 2003; SOARES, 2006). Para Isaaks e Srivastava (1989), significa dizer que a diferença entre dois pontos mais próximos no espaço deve ser menor que aquela obtida entre dois pontos mais distantes. Para Landim (2006) o valor de cada ponto está relacionado de algum modo com valores obtidos a partir de pontos situados a certa distância, sendo razoável pensar que a influência é tanto maior quanto menor for a distância entre os pontos.

Para expressar essa relação é definido o vetor de distância ( $\vec{\Delta h}$ ), o qual tem uma orientação específica. O grau de relação entre pontos numa certa direção pode

ser expresso pela covariância e, embora a covariância exista entre todas as distâncias possíveis ao longo de  $h$ , pode ser estipulado que somente sejam considerados valores entre pontos regularmente espaçados por múltiplos inteiros de  $\Delta h$ . Como a covariância depende do tamanho do vetor  $h$ , se  $h = 0$ , a covariância de  $h$  ( $C(h)$ ) passará a representar a variância. Desse modo, pode-se calcular uma função, denominada semivariância (semivariograma), definida como metade da variância das diferenças (LANDIM, 2006).

O semivariograma experimental ou amostral, a partir dos dados de campo, pode ser calculado a partir da metade da diferença média quadrática entre pares de dados que pertencem a certa classe de distância (*lag*), que compõe a distância máxima de análise, dado pela equação (2) (ISAAKS e SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA, 1998; SOARES, 2006; YAMAMOTO e LANDIM, 2013):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_{(h)}} \sum_{i=1}^{n_{(h)}} [Z_{(x_i)} - Z_{(x_i+h)}]^2 \quad (2)$$

Onde,  $\gamma(h)$  = semivariância estimada;  $n_{(h)}$  = número de pares de valores medidos para a distância  $h$ ;  $Z_{(x_i)}$  = valor da variável no ponto  $x_i$ ;  $Z_{(x_i+h)}$  = valor da variável no ponto  $x_i$  mais uma distância  $h$ .

O semivariograma é composto por: efeito pepita ( $C_0$ ), que corresponde ao erro amostral e as microestruturas não captadas pela escala de amostragem; alcance ( $a$ ), distância em que as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente (zona de influência da amostra), onde a partir do alcance os dados não são correlacionados; contribuição ( $C_1$ ), variância espacialmente estruturada, dada pelo incremento de variabilidade, obtida no pareamento de dados (diferenças), mediante o aumento da distância; e patamar ( $C_0 + C_1$ ), valor determinado a partir do alcance, onde não há acréscimo de variabilidade com o aumento da distância, caracterizando as regiões de comportamento aleatório da amostra, sendo o valor de patamar próximo ao da variância da amostra dada pela estatística clássica (VIEIRA, 1998; CAMARGO, 2001; ANDRIOTTI, 2003; LANDIM, 2003; SOARES, 2006; YAMAMOTO e LANDIM, 2013).

Os modelos teóricos mais utilizados são aqueles que apresentam patamar e conforme Landim (2006) são: Esférico, modelo mais utilizado com uma equação



para as distâncias  $h$  menores que o alcance  $a$  e outra para  $h \geq a$  (equação 3); Exponencial (equação 4), em que  $C_0 + C_1$  é a assíntota de uma curva exponencial e pode ser equalizada junto ao patamar; e Gaussiano (equação 5), onde a curva é parabólica junto à origem e a tangente nesse ponto é horizontal, o que indica pequena variabilidade para curtas distâncias. Para os dois últimos modelos,  $a$ , corresponde ao alcance prático igual à distância segundo a qual 95% do patamar foi alcançado.

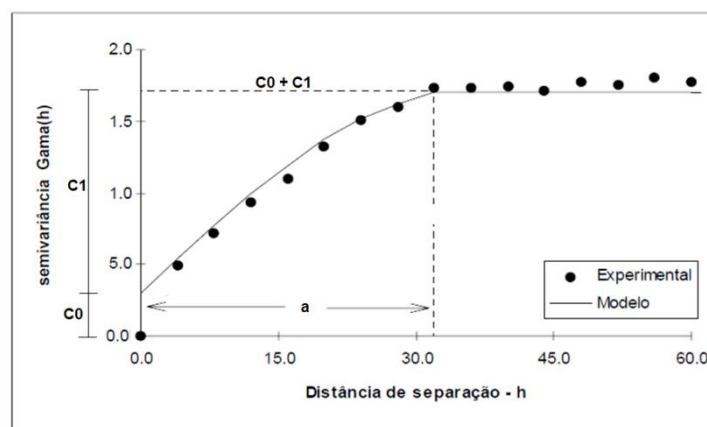
$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1,5 \left( \frac{h}{a} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \right] & \text{para } h < a \\ \gamma(h) = C_0 + C_1 & \text{para } h \geq a \end{cases} \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-3 \frac{h}{a}} \right] \quad (4)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-3 \left( \frac{h}{a} \right)^2} \right] \quad (5)$$

Onde,  $\gamma(h)$  é igual ao valor da semivariância estimada na distância  $h$  considerada;  $C_0$  é o efeito pepita;  $C_1$  é a contribuição;  $a$  é igual ao alcance; e  $h$  a distância a ser considerada. A Figura 2 mostra um semivariograma experimental ajustado a um modelo matemático qualquer com suas diversas partes.

Figura 2 - Semivariograma experimental e modelo matemático ajustado.



Fonte: Adaptado de Genú, 2004.

Para medir o grau de dependência espacial da variável em estudo Biondi et al, (1994) apresentaram uma medida de dependência espacial que relaciona a Contribuição com o Patamar (equação 6) e Cambardella et al, (1994) fizeram o mesmo, relacionado o Efeito Pepita com o Patamar (equação 7).

$$DE(\%) = \frac{C_1}{C_0 + C_1} \cdot 100 \quad (6)$$

$$DE(\%) = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \cdot 100 \quad (7)$$

Onde,  $DE(\%)$  é o grau de dependência espacial em porcentagem;  $C_0$  é o efeito pepita;  $C_1$  é a contribuição; e  $C_0 + C_1$  é o patamar.

Adaptando a classificação de Cambardella et al. (1994) ao índice de Biondi et al. (1994), tem-se que a dependência espacial é forte, se o valor encontrado for maior que 75%; moderada, se os valores estiverem entre 25% e 75%; e fraca, se o valor for menor que 25%.

Para Seidel e Oliveira (2014)...

... as medidas sugeridas por Biondi et al. (1994) e Cambardella et al. (1994) não contemplaram aspectos mais profundos da geometria do semivariograma e conseqüentemente da estrutura de continuidade espacial do fenômeno, o que pode ser considerada uma fragilidade (ou incipiência) dessas duas medidas. Essa fragilidade fica evidente pelo fato de que esses dois índices só consideram os parâmetros contribuição e efeito pepita, ressaltando-se que o patamar é a soma dos dois. Essa é uma incipiência que pode levar o usuário a equivocadas interpretações sobre o grau de dependência espacial de um fenômeno, já que pode considerar iguais variabilidades que são diferentes. Em outras palavras, essa interpretação equivocada pode acontecer, pois dois fenômenos, sob comparação, podem ter valores de contribuição e efeito pepita muito semelhantes, o que faz, por consequência, com que os dois índices assumam valores semelhantes. Contudo, podem ter alcances de dependência espacial totalmente diferentes, tornando-os, em seu todo, diferentes. Dessa forma, o usuário, com base nos dois índices, poderia supor que os fenômenos são semelhantes em termos de dependência espacial, quando na verdade não são.

Assim Seidel e Oliveira (2014), propuseram um índice para medir a dependência espacial, em Geoestatística, que leve em consideração todos os aspectos do semivariograma na caracterização de tal dependência. Esse índice para os modelos de semivariograma esférico, exponencial e gaussiano, pode ser generalizado por (equação 8):

$$IDE_{Modelo}(\%) = FM \cdot \left( \frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \cdot \left( \frac{a}{q \cdot MD} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Onde, FM = fator do modelo;  $C_0$ , o efeito pepita;  $C_1$ , a contribuição;  $a$ , o alcance prático; e  $q \cdot MD$ , o valor que corresponde à fração ( $q$ ) atingida da máxima distância ( $MD$ ) entre pontos amostrados.

O IDE é dado pelas expressões a seguir para cada um dos modelos teóricos mais comuns, seja Esférico (equação 9), Exponencial (equação 10) e Gaussiano (equação 11) (SEIDEL e OLIVEIRA, 2014; 2016):

$$IDE_{Esférico}(\%) = 0,375 \cdot \left( \frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \cdot \left( \frac{a}{0,5MD} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

$$IDE_{Exponencial}(\%) = 0,317 \cdot \left( \frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \cdot \left( \frac{a}{0,5MD} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

$$IDE_{Gaussiano}(\%) = 0,504 \cdot \left( \frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \cdot \left( \frac{a}{0,5MD} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

Em que,  $C_0$  é o efeito pepita;  $C_1$  é a contribuição;  $C_0 + C_1$  é o patamar;  $a$  é o alcance; e  $0,5MD$  é a metade da maior distância ( $MD$ ) entre pontos amostrados, sendo que nos casos em que a relação  $a/0,5MD$  resulte em valor maior que 1, esta razão é, então, truncada em 1, para que assuma apenas valores entre zero e 1.

Para este índice utiliza-se a classificação proposta por Seidel e Oliveira (2016) conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação do Índice de Dependência Espacial proposta por Seidel e Oliveira (2016).

Modelo	Dependência Espacial		
	Fraca	Moderada	Forte
Esférico	IDE ≤ 7%	7% < IDE ≤ 15%	IDE > 15%
Exponencial	IDE ≤ 6%	6% < IDE ≤ 13%	IDE > 13%
Gaussiano	IDE ≤ 9%	9% < IDE ≤ 20%	IDE > 20%

Fonte: Adaptado de Seidel e Oliveira (2016).

A partir da estimativa da semivariância empírica (ou experimental), ajusta-se um modelo teórico aos pontos obtidos (FARACO et al., 2008) e resta saber se ele é

eficiente para interpolar valores, permitindo estimativas confiáveis para a construção de mapas temáticos (CRESSIE, 1985).

Os métodos de validação comparam valores teóricos do modelo geoestatístico escolhido e os valores empíricos obtidos na amostragem. Com base na análise desses erros de estimação, poderá ser selecionado o melhor modelo de semivariância. Entre os principais critérios para validação, encontram-se os de Informação de Akaike, de Filliben, de validação cruzada e o máximo valor do logaritmo da função verossimilhança (FARACO et al., 2008).

Para Isaaks e Srivastava (1989) a validação cruzada é uma técnica de avaliação de erros de estimativas que permite comparar os valores da amostra com os preditos. O valor da amostra, em certa localização  $Z_{(x_i)}$ , é temporariamente descartado do conjunto de dados e, então, é feita uma previsão por krigagem no local  $\hat{Z}_{(x_i)}$ , usando-se as amostras restantes (FARACO et al., 2008).

Podemos desta forma obter um erro médio ( $EM$ ) comparando os valores reais dos estimados pelo modelo, conforme equação 12:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z_{(x_i)} - \hat{Z}_{(x_i)}] \quad (12)$$

Em que,  $n$  é o número de dados;  $Z_{(x_i)}$ , valor observado no ponto  $x_i$ ; e  $\hat{Z}_{(x_i)}$ , valor predito por krigagem ordinária no ponto  $x_i$ , sem considerar a observação  $Z_{(x_i)}$ .

Segundo Faraco et al. (2008), McBratney e Webster (1986) e Cressie (1993) apresentam erro médio reduzido ( $\overline{ER}$ ), desvio-padrão dos erros médios ( $DP_{EM}$ ), desvio-padrão dos erros reduzidos ( $S_{ER}$ ) e do erro absoluto ( $EA$ ), como instrumento para avaliar modelos. O erro médio reduzido ( $\overline{ER}$ ) é definido pela equação 13:

$$\overline{ER} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[Z_{(x_i)} - \hat{Z}_{(x_i)}]}{\sigma(\hat{Z}_{(x_i)})} \quad (13)$$

Onde,  $\sigma(\hat{Z}_{(x_i)})$  é o desvio-padrão da krigagem no ponto  $x_i$ , sem considerar a observação  $Z_{(x_i)}$ .

O desvio-padrão dos erros médios ( $DP_{EM}$ ) e o dos erros médios reduzidos ( $S_{ER}$ ) podem ser obtidos pelas equações 14 e 15, respectivamente:

$$DP_{EM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_{(x_i)} - \widehat{Z}_{(x_i)}|} \quad (14)$$

$$S_{ER} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Z_{(x_i)} - \widehat{Z}_{(x_i)}|}{\sigma(\widehat{Z}_{(x_i)})}} \quad (15)$$

Na condição de dados sem viés, o valor populacional para o erro médio reduzido deve ser zero e o do desvio-padrão do erro reduzido igual a 1 (MCBRATNEY e WEBSTER, 1986; CRESSIE, 1993; MELLO et al., 2005), portanto, o valor de  $EM$  e  $\overline{ER}$  mais próximos de zero, o valor  $DP_{EM}$  menor e o valor de  $S_{ER}$  mais próximos de um são os critérios para escolha do melhor modelo ajustado (FARACO et al., 2008).

O erro absoluto ( $EA$ ) é uma medida da magnitude dos erros na unidade da variável. Conhecendo-se o conjunto de valores medidos e preditos por krigagem ordinária  $Z_{(x_i)}$  e  $\widehat{Z}_{(x_i)}$ , respectivamente, é possível definir o erro absoluto na unidade da variável estudada, pela equação 16:

$$EA = \sum_{i=1}^n |Z_{(x_i)} - \widehat{Z}_{(x_i)}| \quad (16)$$

Outra estatística que pode ser utilizada nos resultados da validação cruzada é o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  Adj.). Quanto mais próximo de um o valor de  $R^2$ , melhor será a qualidade de ajuste dos dados estimados pela validação cruzada com os dados amostrais (COSTA, 2012).

### 2.3 Krigagem Ordinária Pontual

A interpolação espacial de valores amostrados pode ser feita com métodos de duas grandes classes, os determinísticos (exemplos: método dos polígonos de influência, triangulação, inverso da potência da distância) e os geostatísticos (que utilizam o variograma ou o correlograma para o cálculo da matriz de pesos do processo de interpolação) (CORREA, 2010). Para Landim (2006), a Krigagem é um

processo de estimativa de valores distribuídas no espaço, e/ou no tempo, a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo variograma.

Desta forma, conhecido o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, podem-se interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima (Vieira, 2000). Corroborando com os autores acima, GENÚ (2004), afirma que a krigagem tem como base os dados amostrais da variável regionalizada e as propriedades estruturais do semivariograma obtido a partir destes dados o que permite visualizar o comportamento da variável na região através de um mapa de isolinhas ou de superfície.

Para Landim (2006) a metodologia geoestatística apresenta diversas técnicas de estimativas disponíveis e a mais usual é a krigagem ordinária. A krigagem ordinária é um método local de estimativa e, dessa forma, a estimativa em um ponto não amostrado resulta da combinação linear de valores encontrados na vizinhança próxima (YAMAMOTO e LANDIM, 2013), conforme a equação (17).

$$Z^*_{KO(x_0)} = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (17)$$

Onde  $Z^*_{KO(x_0)}$  é o valor estimado da variável para o ponto  $x_0$ ;  $\lambda_i$  a matriz de pesos obtidas do semivariograma e  $Z(x_i)$  são os valores da variável dos pontos em torno ao ponto em que se está estimando.

A medida do erro associado à estimativa é que distingue o método da krigagem em relação aos demais algoritmos de interpolação e, desse modo, quando da sua aplicação sempre resultam dois mapas: um com a distribuição dos valores interpolados e outro com a variâncias, ou o desvios padrão, referentes aos valores estimados (LANDIM, 2006).

## 2.4 Análise Temporal

Metodologias de detecção de mudança do uso do solo baseada nos níveis digitais dos pixels e em objetos, foram apontadas por Hussain et al. (2013), visando o uso de dados de sensores remotos para auxiliar no planejamento territorial e

monitoramento de uso e cobertura do solo urbano e rural. Dentre as técnicas existentes se destacam a diferenças entre imagens, razão entre bandas e análise de vetores de mudança.

Segundo Kiel (2008), a detecção das mudanças é quantitativa quando se preocupa somente em quantificar as transformações que ocorreram informando o estado de cada um dos pixels em termos de “mudança ou não mudança”, delimitando as regiões com e sem essas mudanças. Ela é qualitativa, se a informação da mudança, para além da localização e quantificação, avança até uma discriminação em classes, habilitando o estudo das trajetórias dos valores digitais dos pixels entre elas, sendo que a abordagem qualitativa depende de uma etapa quantitativa.

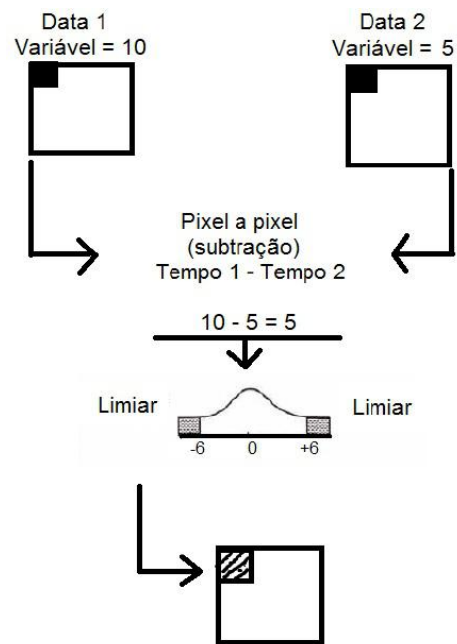
Robb e Russell (1998) utilizaram a diferença entre imagens/bandas por meio da subtração do ND (nível digital) entre duas datas. A diferença entre imagens foi realizada utilizando as primeiras quatro bandas das imagens orbitais do sensor TM (*Thematic Mapper*), Landsat 5 (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo). Uma série de valores de limiares com base em desvios padrão da média foi utilizada na nova imagem para determinar a transformação de pixels.

Segundo Maldonado (2004) os limiares a serem utilizados para o fatiamento dos resultados obtidos se baseiam em parâmetros estatísticos obtidos da própria imagem diferença, em que para cada imagem podem ser utilizados como ponto central do fatiamento a Moda, a Mediana ou a Média.

Para Maldonado (2004), dados com distribuição normal permitem a utilização da média ( $\bar{x}$ ) e do desvio padrão ( $\sigma$ ) como limiares para o fatiamento. Assim, por ser uma distribuição contínua e simétrica o eixo X pode assumir valores de  $-\infty$  até  $+\infty$ , com a delimitação dos intervalos entre  $\pm 0,5\sigma$ . Já Santos et al. (2005) propôs a utilização de intervalos de  $\pm 1,0\sigma$ , para quantificar as áreas de mudança e não mudança do uso do solo.

Estas técnicas utilizadas no sensoriamento remoto podem ser utilizadas para o fatiamento de imagens diferença em outras áreas de aplicação como, por exemplo, entre mapas interpolados da mesma área de estudo em anos diferentes. Na Figura 3 podemos observar uma adaptação para qualquer variável de interesse.

Figura 3 – Imagem de detecção de mudanças por diferença entre os valores encontrados nas duas datas de análise.



Fonte: Adaptado de Robb e Russel (1998).

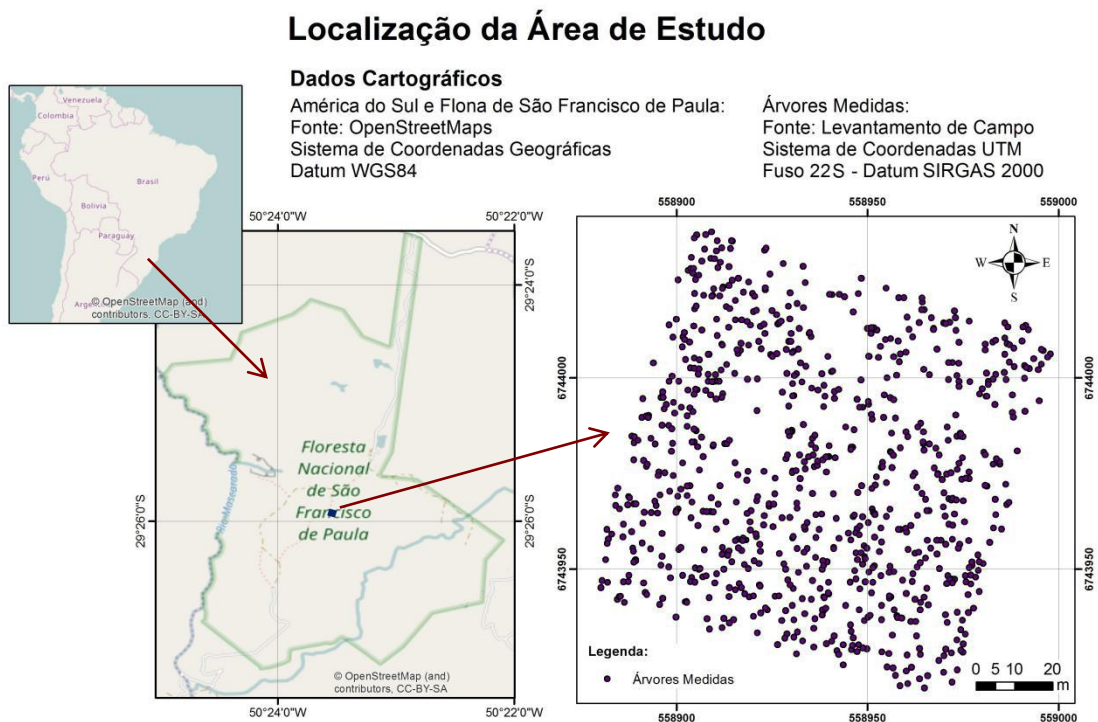


### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de Estudo

Este estudo foi realizado na Floresta Nacional de São Francisco de Paula (FLONA-SFP), localizada no município de São Francisco de Paula (RS), entre as latitudes  $-29,392026^\circ$  e  $-29,454411^\circ$  e as longitudes  $-50,367785^\circ$  e  $-50,417078^\circ$  (GOOGLE MAPS, 2017). A parcela selecionada para a realização do trabalho foi a 1539 e pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Área de Estudo.



Fonte: OpenStreetMaps; Autor.

O clima da região é temperado com invernos rigorosos, registrando-se neve em algumas ocasiões. Há ocorrência de geadas e nevoeiros. A temperatura média anual é inferior a  $18,5^\circ\text{C}$  (MORENO, 1961). O solo é do tipo Cambissolo Húmico Alumínico típico (Streck et al., 2002)

A área da FLONA caracteriza-se por ter um relevo ondulado a fortemente ondulado com recorte profundo de alguns rios. Há regiões abruptas que originam um relevo relativamente movimentado. A vegetação natural pertence ao tipo fitogeográfico Floresta Ombrófila Mista ou Mata com Araucária ou com Pinheiro Brasileiro, cobrindo cerca de 56% de sua área total (LONGHI et al., 2006).

### **3.2 Inventário Florestal**

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos em duas etapas. Nos anos 1999 e 2000 foi realizado no Rio Grande do Sul o Inventário Florestal Contínuo (IFC) que teve por objetivo verificar a situação dos maciços florestais nativos e plantados no estado.

Durante o IFC foram demarcadas parcelas permanentes de 1 ha de dimensão e na Floresta Nacional de São Francisco de Paula instalaram-se 10 destas parcelas. As metodologias empregadas para a instalação das parcelas e a obtenção das medições realizadas estão descritas em Sebem (2000).

O IFC realizado em 2000 no Rio Grande do Sul foi repetido nas parcelas da FLONA nos anos seguintes até o 2010. Os dados aqui utilizados foram disponibilizados por Longhi (2016) e foram utilizados àqueles relativos ao levantamento realizado na parcela 1539 no ano de 2001.

No ano de 2017 a parcela 1539 foi revisitada e a CAP (Circunferência a Altura do Peito, 1,30 m) foi medida novamente nas árvores com no mínimo 30 cm de circunferência. Neste ano de remedição da parcela, muitas árvores já não estavam mais na parcela (geralmente mortas) e outras novas árvores foram incluídas por já terem atingido a circunferência mínima, limite de inclusão.

Neste trabalho foi utilizada apenas a posição de cada árvore no espaço e as 7 famílias botânicas mais abundantes na área, a saber: *Aquifoliaceae*, *Araucariaceae*, *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae*, *Lauraceae*, *Myrtaceae* e *Sapindaceae*.

### **3.2 Processo Pontual**

Foi utilizado o processo pontual univariado para avaliar o padrão de distribuição espacial de cada uma das famílias botânicas e o processo pontual (bivariado) para avaliar a relação espacial existente entre as *Araucariaceae* e as

outras famílias botânicas do estudo. Para isso foi construído um banco de dados com a posição de cada uma das árvores na unidade amostral e o nome abreviado da família botânica como marca, conforme exemplo da Figura 5.

A biblioteca *spatstat* (BADDELEY et al., 2015) para o *software* R versão 3.3.3 (R CORE TEAM, 2015), foi utilizada para a aplicação da Função K de Ripley nos processos pontuais, com e sem marca, realizados. O Apêndice A mostra os algoritmos em R utilizados no trabalho para o Processo Pontual.

Figura 5 – Banco de dados para realizar o processo pontual marcado.

ER	NR	FAMILIA
0.564	29.051	Sap
0.214	27.173	Sap
6.082	28.661	Aquif
4.521	24.118	Sap
5.037	24.799	Myrt
5.382	24.905	Sap
7.543	30.417	Aquif
1.835	42.444	Laur
11.498	46.871	Laur

Fonte: Autor.

Observa-se no banco de dados (Figura 5) que as coordenadas UTM foram transformadas em coordenadas locais para a realização do processo pontual com o objetivo de facilitar definição dos limites da janela de interpolação. Além disso, com a utilização das coordenadas UTM o software truncava os valores sem nenhuma casa decimal prejudicando a precisão da análise espacial.

### 3.2 Obtenção da Variável de Trabalho

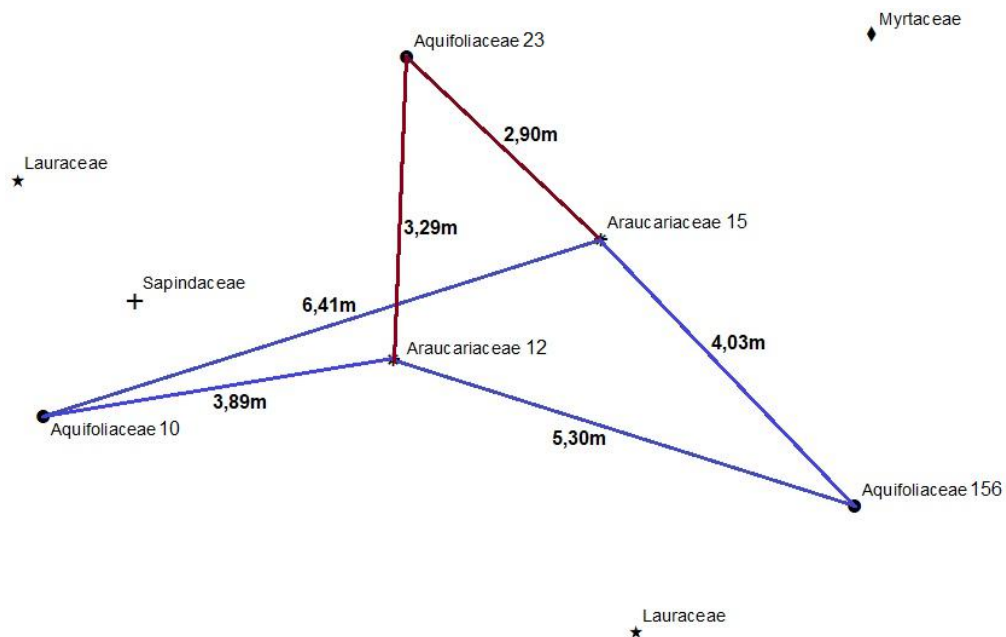
A partir da distribuição espacial (coordenadas posicionais) das árvores medidas na parcela 1539 da Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, buscamos estabelecer uma relação espacial entre as famílias a serem estudadas.

Levando em consideração que o Processo Pontual analisa a relação entre os indivíduos a partir da posição espacial dos mesmos a variável a ser utilizada nos processos geoestatísticos também deve permitir esta relação entre cada indivíduo da Família *Araucariaceae* e das demais famílias botânicas em estudo.

Serão considerados pontos amostrais os indivíduos pertencentes a Família *Araucariaceae* e será calculada a distância em metros da árvore mais próxima da outra família botânica em tela. A hipótese que nos leva a considerar esta distância como a variável mais adequada para analisar a associação das famílias botânicas às *Araucariaceae* provem da premissa de que quanto mais próximas estão as árvores, mais associadas elas são. Desta forma poderemos comparar os resultados obtidos pela Geoestatística com àqueles obtidos pelos processos pontuais marcados bivariados. Assim, por exemplo, se obtenho forte dependência espacial para a distância das *Aquifoliaceae* às *Araucariaceae* o processo pontual tenderá a apresentar associação entre ambas famílias botânicas e vice-versa.

A Figura 6 mostra um exemplo de como o será realizado o cálculo em um extrato de disposição espacial das árvores para o ano de 2001.

Figura 6 – Procedimento para obtenção da variável de trabalho.



Fonte: Autor.

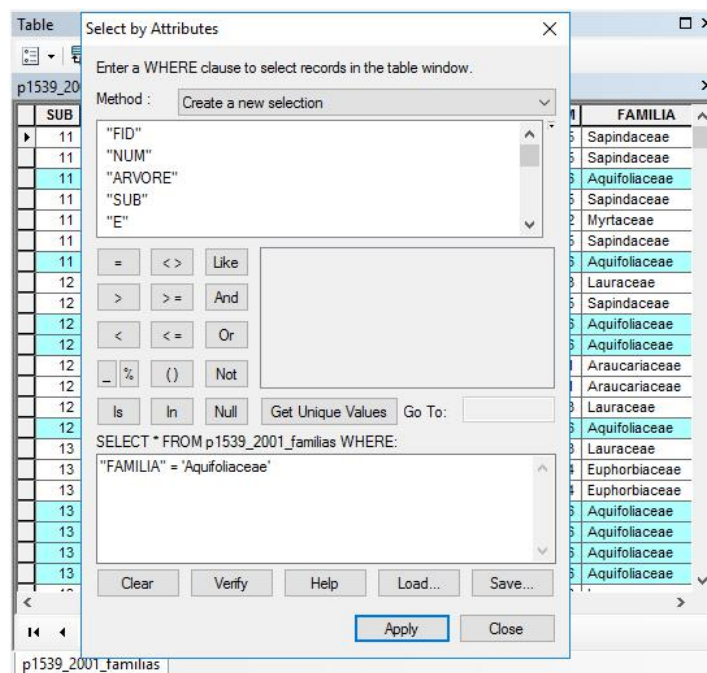
Podemos observar na disposição espacial das árvores da Figura 6 que temos duas *Araucariaceae* próximas (12 e 15) a uma distância de 2,62 m entre elas e 3 indivíduos da família *Aquifoliaceae* (10, 23 e 156). Cada uma das *Araucariaceae* terá como valor para a variável de trabalho a menor distância entre as *Aquifoliaceae* de seu entorno. A *Araucariaceae* 12 receberá a distância de 3,29 m e a *Araucariaceae* 15 de 2,90 m. Procedendo para todos os pontos amostrais da parcela teremos os

valores que relacionam a disposição espacial da família em tela com as *Araucariaceae*. O mesmo procedimento será realizado para as demais famílias botânicas e assim serão gerados 12 conjuntos de dados, 6 para o ano de 2001 e 6 para o ano de 2017.

O primeiro passo será a obtenção dos vetores de posição de cada árvore de cada família botânica por meio da função **Seleção por atributos** (*Select by attributes*) do software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2011). No exemplo da Figura 7 estão sendo selecionadas as árvores da família *Aquifoliaceae* de 2001.

Após a seleção das árvores de cada família utiliza-se a opção *Data* → *Export Data* para salvar os dados em um novo arquivo no formato *shape file*, do tipo pontos.

Figura 7 - Seleção de famílias por atributos.



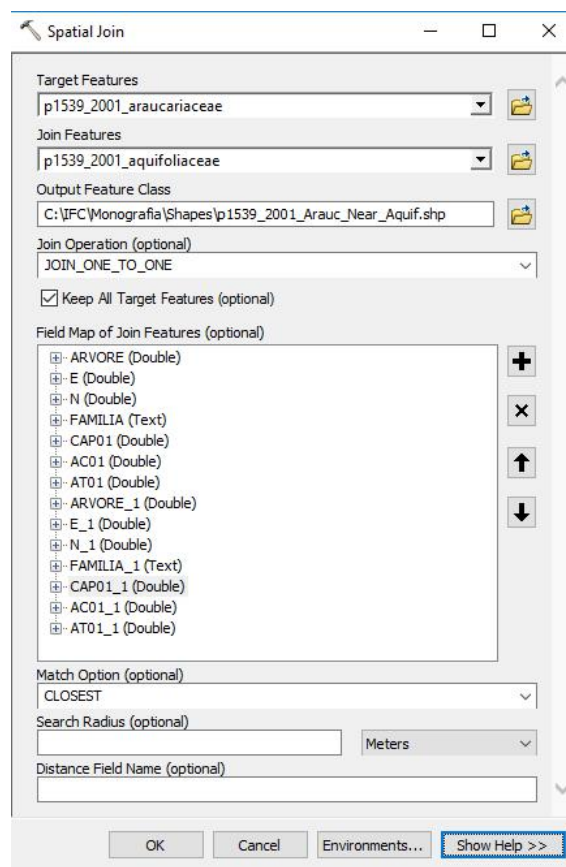
Fonte: Autor.

Para encontrarmos a árvore mais próxima às *Araucariaceae* foi utilizada a função *Spatial Join* conforme Figura 8. No exemplo podemos observar as seguintes configurações: Pontos amostrais definidos na função *Target Features* como sendo as árvores de *Araucariaceae* para o ano 2001; União espacial por meio da definição *Join Features*, que neste caso foi a família *Aquifoliaceae*; Operador de união utilizado na função *Join Operator*, em que para cada *Araucariaceae* foi feita a relação com apenas uma *Aquifoliaceae* por meio do operador *JOIN\_ONE\_TO\_ONE*;

Critério de união utilizado por meio de *Match Option* em que se selecionou a opção *CLOSEST*, ou seja, a árvore mais próxima.

O resultado desta união espacial foi um vetor no formato *shape file* com as informações dos dois vetores incluídos na união espacial realizada. O banco de dados terá as coordenadas das árvores das *Araucariaceae* e das árvores da outra família botânica, permitindo assim calcular a distância entre as mesmas.

Figura 8 - União espacial da árvore mais próxima da família *Aquifoliaceae* e as *Araucariaceae* na parcela 1539 em 2001.



Fonte: Autor.

Para o cálculo da distância entre as árvores selecionadas na função *Spatial Join* foi utilizado o *software* MS Excel 2016 por meio da equação 18:

$$Dist = \sqrt{(CoordE_1 - CoordE_2)^2 + (CoordN_1 - CoordN_2)^2} \quad (18)$$

Onde, *Dist* =Distância em metros; *CoordE* = Coordenada Este (Leste) do sistema UTM em metros; e *CoordN* = Coordenada Norte do sistema UTM em metros.

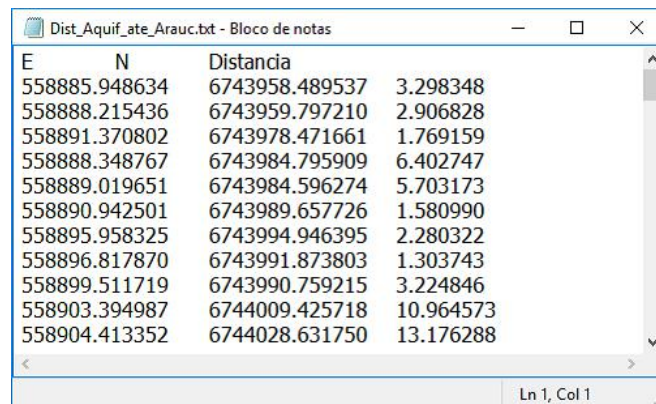
### 3.4 Interpolação Espacial

As tabelas contendo as coordenadas obtidas no processo de união espacial das árvores mais próximas das *Araucariaceae* foram transformadas em distância e foram utilizadas nos processos de análise variográfica e interpolação espacial.

Para cada família em cada ano de estudo foi gerado um banco de dados no formato texto com as coordenadas das *Araucariaceae* e a distância da árvore mais próxima da outra família considerada, conforme Figura 9. No exemplo temos as coordenadas das *Araucariaceae* do ano de 2001 e a distância da *Aquifoliaceae* mais próxima de cada *Araucariaceae*.

Os procedimentos de análise variográfica, ajuste de modelos teóricos, validação cruzada e krigagem ordinária foram realizados com a utilização da biblioteca *geoR* (RIBEIRO JR. e DIGGLE, 2001). O Apêndice B mostra os algoritmos utilizados nos procedimentos geoestatísticos.

Figura 9 – Banco de dados para realizar os processos de interpolação espacial.



E	N	Distancia
558885.948634	6743958.489537	3.298348
558888.215436	6743959.797210	2.906828
558891.370802	6743978.471661	1.769159
558888.348767	6743984.795909	6.402747
558889.019651	6743984.596274	5.703173
558890.942501	6743989.657726	1.580990
558895.958325	6743994.946395	2.280322
558896.817870	6743991.873803	1.303743
558899.511719	6743990.759215	3.224846
558903.394987	6744009.425718	10.964573
558904.413352	6744028.631750	13.176288

Fonte: Autor.

Para cada uma das famílias será realizado o estudo semivariográfico utilizando a distância máxima (duas *Araucariaceae* mais distantes entre si) entre os pontos amostrais (hmax 100%), 90% da distância máxima (hmax 90%), 80% (hmax 80%), 70% (hmax 70%), 60% (hmax 60%) e 50% da distância máxima (hmax 50%). A distância máxima a ser utilizada nos procedimentos de ajuste variográfico levará em conta o número de pares utilizados para o cálculo da semivariância e deverá ter um valor mínimo de 30 pares.

Foram realizadas 100 simulações variográficas na área de estudo modificando a posição de cada ponto (árvore) para verificar se os dados possuem dependência espacial ou não. Com os valores máximos e mínimos obtidos das 100 simulações foram criados envelopes de independência espacial e plotados conjuntamente com os valores de semivariância obtidos com a posição original das árvores. Aqueles semivariogramas originais que ficaram contidos dentro do envelope de simulação demonstram que não houve dependência espacial no semivariograma original. Caso contrário observou-se dependência espacial.

Para a escolha do melhor modelo teórico ajustado aos dados do semivariograma experimental foram considerados 14 critérios de comparação. Para o ajuste variográficos foram utilizados: menor efeito pepita ( $C_0$ ); maior contribuição ( $C_1$ ); patamar ( $C_0 + C_1$ ) mais próximo da variância total dos dados; alcance ( $a$ ) compatível com o suporte espacial; e maior dependência espacial ( $DE$ ) e índice de dependência espacial ( $IDE$ ). Para a validação cruzada: menor soma de quadrados ( $SQ$ ); menor erro médio ( $EM$ ) e desvio padrão dos erros médios ( $DP_{EM}$ ); erro médio reduzido ( $\overline{ER}$ ) mais próximo a zero; desvio padrão dos erros reduzidos ( $S_{ER}$ ) mais próximo a 1; menor erro absoluto ( $EA$ ); maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e coeficiente de determinação ajustado ( $R^2Adj$ ).

A validação cruzada será executada conforme descrito por Isaaks e Srivastava (1989) e Faraco et al. (2008), no pacote *geoR* (RIBEIRO JR. e DIGGLE, 2001), assim como a Krigagem Ordinária Pontual que foi realizada com o modelo teórico selecionado, pelo método clássico, utilizando como critério de peso o número de pares e a distância máxima definida.

### 3.5 Dinâmica Espacial

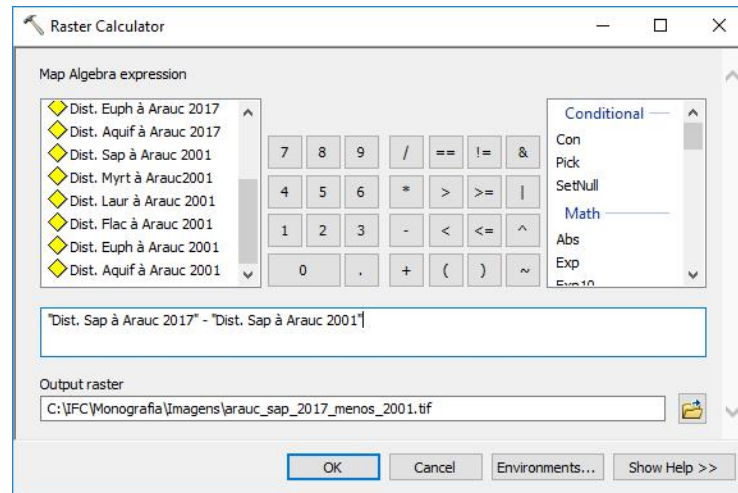
Para estudar as mudanças nos padrões de distribuição espacial das famílias botânicas na área de estudo entre os anos de análise, foi utilizada a álgebra de mapas por meio da subtração entre os valores da data atual (2017) e data antiga (2001), como pode ser observado na Figura 10 e utilização da equação 19.

$$IAE_{FBi} = IEFBi_{2017} - IEFBi_{2001} \quad (19)$$



Onde,  $IAE_{FBi}$  = Imagem de Alterações Espaciais para a i-ésima Família Botânica;  $IEFBI_{2017}$  = Interpolação Espacial realizada para a Família Botânica em 2017; e  $IEFBI_{2001}$  = Interpolação Espacial realizada para a Família Botânica em 2001.

Figura 10 – Álgebra de Mapas entre a data atual e a data antiga.



Fonte: Autor.

Com o resultado da subtração foi realizada uma reclassificação para as classes: Saída de Árvores; Não Mudança da Distribuição Espacial; e Ingresso de Árvores na floresta. Como critério de separação destas classes utilizou-se metodologia empregada por Santos et al. (2005) que considera que valores existentes entre a média menos um desvio padrão e a média mais um desvio padrão caracterizam não mudança na cobertura do solo. A Tabela 2 mostra os limites utilizados para esta classificação.

Todos os mapas apresentados no trabalho foram gerados no software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2011) por meio da confecção de *layout* padrão.

Tabela 2 – Classificação das mudanças nos padrões de distribuição espacial.

<b>Classes</b>	<b>Amplitude das Classes</b>
Ingresso de Árvores	$Valor\ Mínimo \leq x \leq \bar{x} - s$
Não Mudança	$\bar{x} - s \leq x \leq \bar{x} + s$
Saída de Árvores	$\bar{x} + s \leq x \leq Valor\ Máximo$

Onde:  $x$  = variável de interesse;  $\bar{x}$  = média;  $s$  = desvio padrão. Fonte: Modificado de Santos et al. (2005); Autor.

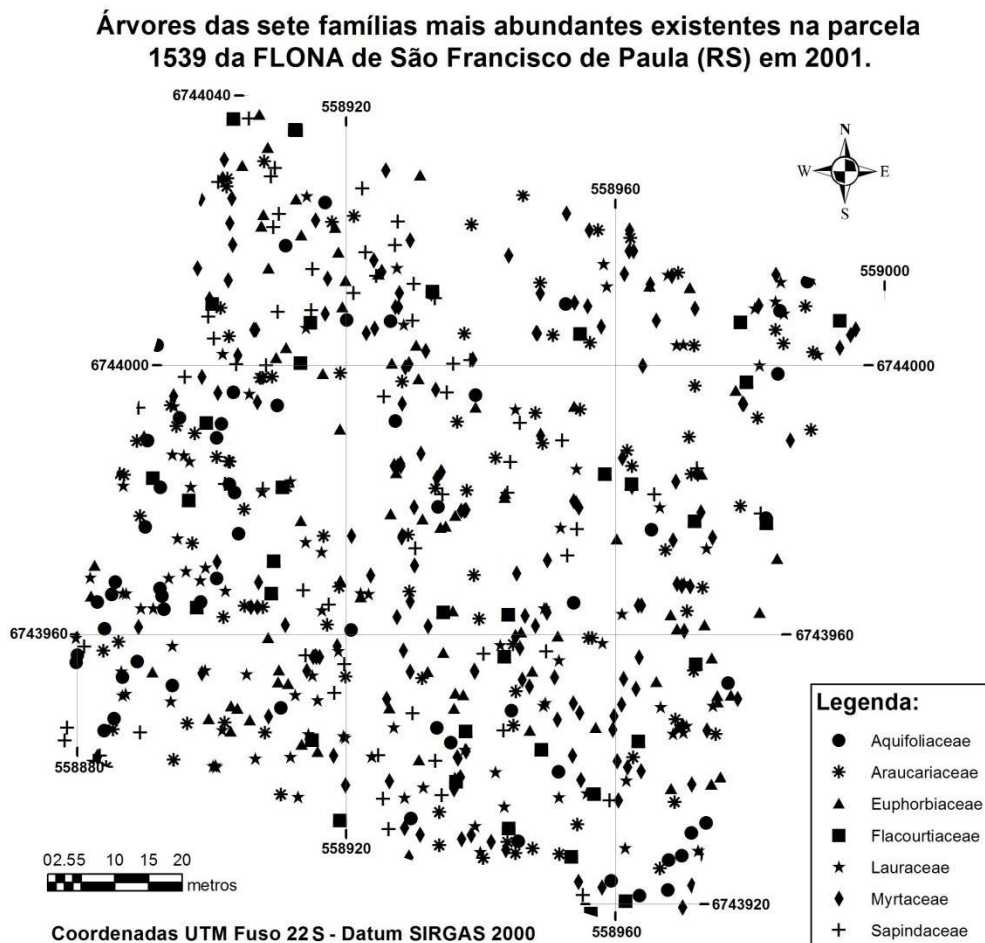
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise dos dados obtidos no Inventário Florestal de 2001

#### 4.1.1 Distribuição Espacial das Árvores Medidas

A Figura 11 apresenta a distribuição espacial das árvores medidas que correspondem as sete famílias mais abundantes nesta unidade amostral (*Aquifoliaceae*, *Araucariaceae*, *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae*, *Lauraceae*, *Myrtaceae* e *Sapindaceae*).

Figura 11 - Distribuição espacial das árvores medidas na parcela 1539 em 2001.



Fonte: Autor.

A Tabela 3 apresenta um resumo estatístico da variável número de indivíduos, da Circunferência a Altura do Peito (CAP) e da Área Basal (AB) de todos os indivíduos mensurados no ano de 2001 na parcela 1539. A tabela apresenta a descrição desta forma para evidenciar as sete famílias mais abundantes na parcela.

Tabela 3 – Principais estatísticas das árvores medidas na parcela 1359 em 2001.

Famílias / Gêneros	N	Proporção do N (%)	Densidade (Árv./m <sup>2</sup> )	CAP Médio (cm)	Somatório da AB (m <sup>2</sup> )	Proporção de AB (%)	PC
<i>Aquifoliaceae</i>	58	8,15	0,0058	54,60	1,536	3,85	6,00
<i>Ilex</i>	58	8,15	0,0058	54,60	1,536	3,85	6,00
<i>Araucariaceae</i>	97	13,62	0,0097	158,46	22,865	57,32	35,47
<i>Araucaria</i>	97	13,62	0,0097	158,46	22,865	57,32	35,47
<i>Euphorbiaceae</i>	82	11,52	0,0082	42,52	1,370	3,43	7,48
<i>Sapium</i>	2	0,28	0,0002	31,10	0,015	0,04	0,16
<i>Sebastiania</i>	80	11,24	0,0080	42,80	1,354	3,40	7,32
<i>Flacourtiaceae</i>	37	5,20	0,0037	39,62	0,485	1,22	3,21
<i>Casearia</i>	26	3,65	0,0026	37,59	0,302	0,76	2,20
<i>Xylosma</i>	11	1,54	0,0011	44,43	0,183	0,46	1,00
<i>Lauraceae</i>	96	13,48	0,0096	60,06	3,321	8,33	10,90
<i>Cinnamomum</i>	2	0,28	0,0002	71,60	0,090	0,23	0,25
<i>Cryptocarya</i>	39	5,48	0,0039	49,32	0,913	2,29	3,88
<i>Nectandra</i>	34	4,78	0,0034	60,22	1,107	2,77	3,78
<i>Ocotea</i>	21	2,95	0,0021	78,65	1,211	3,04	2,99
<i>Myrtaceae</i>	169	23,74	0,0169	57,99	5,386	13,50	18,62
<i>Acca</i>	5	0,70	0,0005	40,44	0,068	0,17	0,44
<i>Blepharocalyx</i>	87	12,22	0,0087	69,54	3,922	9,83	11,03
<i>Calypttranthes</i>	1	0,14	0,0001	32,80	0,009	0,02	0,08
<i>Campomanesia</i>	36	5,06	0,0036	47,66	0,697	1,75	3,40
<i>Eugenia</i>	9	1,26	0,0009	49,08	0,182	0,46	0,86
<i>Myrceugenia</i>	21	2,95	0,0021	43,07	0,338	0,85	1,90
<i>Myrcianthes</i>	1	0,14	0,0001	50,00	0,020	0,05	0,10
<i>Myrrhinium</i>	8	1,12	0,0008	43,83	0,129	0,32	0,72
<i>Siphoneugena</i>	1	0,14	0,0001	52,60	0,022	0,06	0,10
<i>Sapindaceae</i>	64	8,99	0,0064	54,35	1,732	4,34	6,66
<i>Allophylus</i>	1	0,14	0,0001	34,50	0,009	0,02	0,08
<i>Cupania</i>	16	2,25	0,0016	45,45	0,281	0,70	1,48
<i>Matayba</i>	47	6,60	0,0047	57,80	1,442	3,61	5,11
Outras	109	15,31	0,0109	54,89	3,194	8,01	11,66
<b>Total</b>	<b>712</b>	<b>100,00</b>	<b>0,0712</b>	<b>68,14</b>	<b>39,889</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Onde: N = Número de Indivíduos; Árv. = Árvore; AB = Área Basal (área da base da árvore obtida com o CAP); CAP = Circunferência a Altura do Peito (1,30m); PC = Porcentagem de Cobertura. Fonte: Autor.

As 109 árvores existentes das outras 18 famílias botânicas representam 15,31% dos indivíduos da parcela e totalizam apenas 8,01% da área basal da parcela com 3,194 m<sup>2</sup>. Fica evidente a importância das *Araucariaceae* na composição florística da FOM, já que apenas 13,62% dos indivíduos existentes

correspondem a 57,32% da área basal (22,865 m<sup>2</sup>) e possuem um CAP médio de mais de 1,5 m. Os restantes 38,67% da área basal (13,830 m<sup>2</sup>) da parcela estão distribuídos entre as outras seis famílias botânicas, onde se destacam as *Myrtaceae* com quase 25% dos indivíduos existentes (23,74%).

A porcentagem de cobertura (PC) combina a Dominância Relativa (somatório da área basal da família/gênero dividida pela área basal total) e a Densidade Relativa (número de indivíduos da família/gênero pelo número total de indivíduos). Como podemos observar as *Araucariaceae* detêm mais de 1/3 (35,47%) da porcentagem de cobertura na área de estudos, ficando em segundo lugar as *Myrtaceae* com 18,62% e em seguida as *Lauraceae* com 10,90%.

Os procedimentos adotados para a avaliação da distribuição espacial das famílias botânicas na FOM por meio dos processos pontuais e da variável utilizada nos procedimentos geoestatísticos não foram prejudicados pela retirada da análise dos 109 indivíduos das outras famílias botânicas.

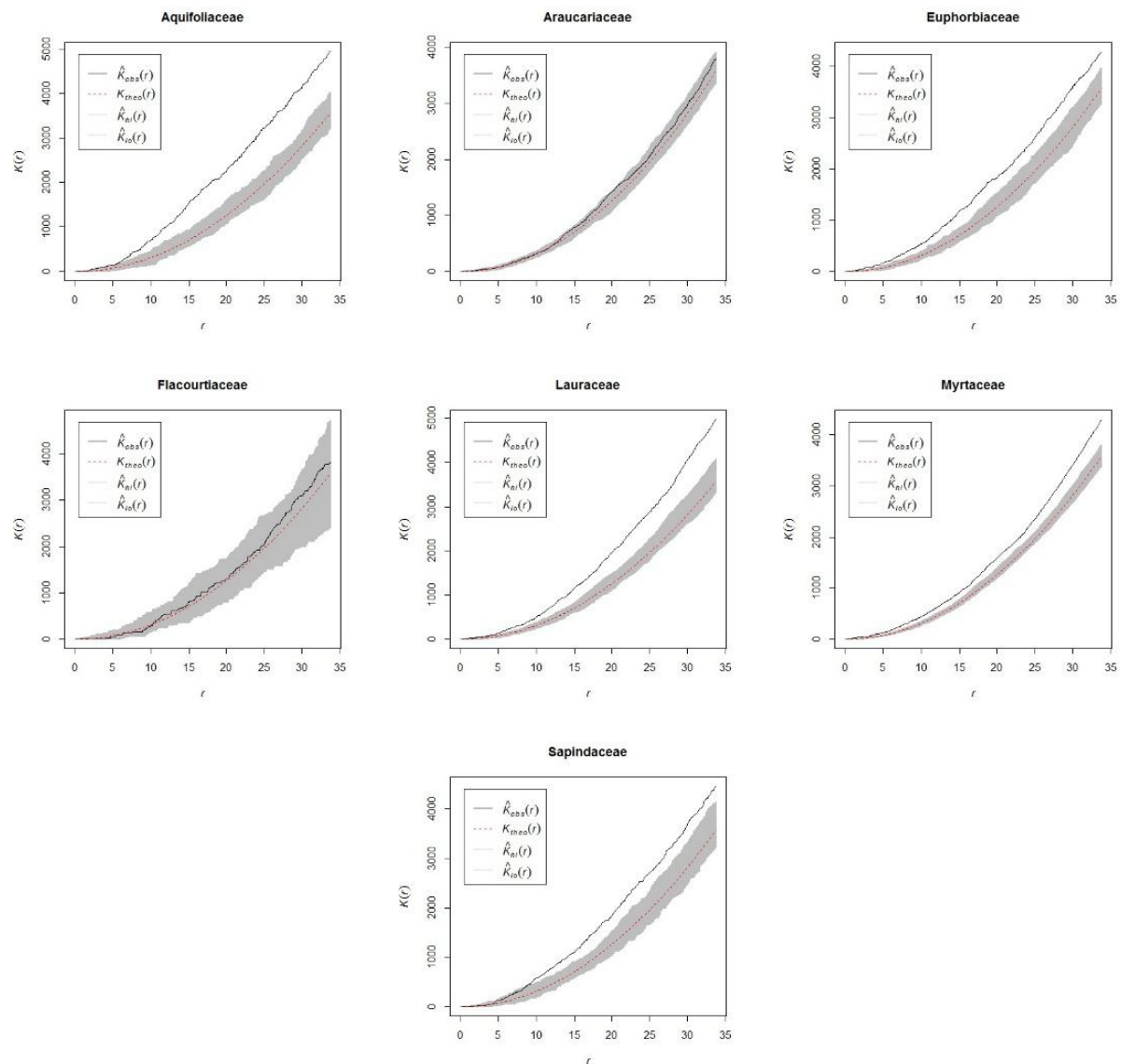
#### 4.1.2 Processo Pontual

A Figura 12 mostra o resultado do estudo espacial por processo pontual para as famílias botânicas em estudo na parcela 1539 em 2001.

Observa-se que para as famílias botânicas *Araucariaceae* e *Flacourtiaceae* a distribuição espacial das árvores na parcela mostra uma completa aleatoriedade espacial, enquanto que para as demais famílias os gráficos apresentam indicação de forte agregação de indivíduos. Para as primeiras a coleta de pinhão todos os anos na área da FLONA pode estar provocando a baixa concentração de regeneração sob/próximo as árvores da espécie produzindo a distribuição espacial aleatória. Para as *Euphorbiaceae*, *Lauraceae* e *Myrtaceae* esta agregação aparece abaixo dos 5 m e para as *Aquifoliaceae* e *Sapindaceae* entre 5 e 10 m.

A completa aleatoriedade espacial para as *Araucariaceae* não foi observada em estudo realizado por Silvestre et al. (2012), que obteve distribuição espacial agregada para as espécies *Araucaria angustifolia*, *Cinnamodendron dinisii* e *Ilex paraguariensis*. No caso da última espécie observa-se o mesmo padrão agregado para as *Aquifoliaceae*, cuja espécie corresponde a 82,75% do total da família botânica encontrada na área de estudo.

Figura 12 - Função K de Ripley e envelope de simulação, para a distribuição espacial, das famílias botânicas na parcela 1539 em 2001.



Fonte: Autor.

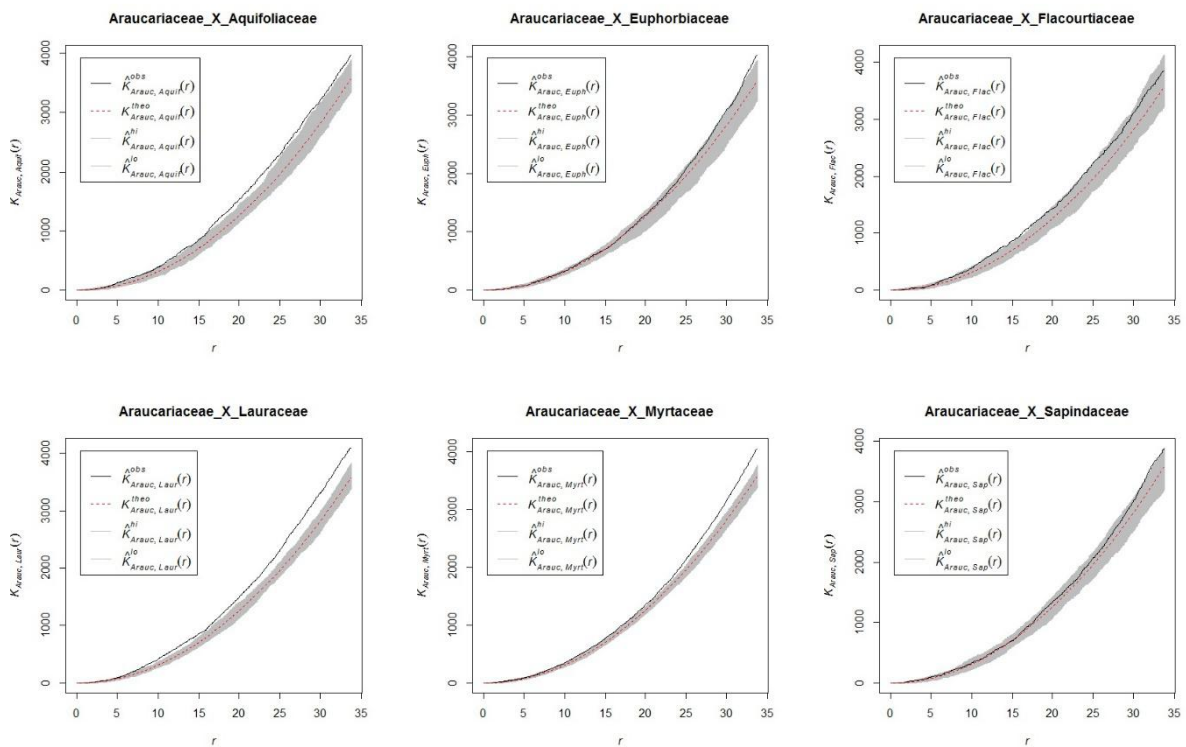
A forte aglomeração de indivíduos das famílias botânicas *Lauraceae* e *Myrtaceae* também foram encontradas nos trabalhos de Nascimento et al. (2001) e Canalez et al. (2006), respectivamente.

Quando observa-se o processo pontual marcado categórico com duas marcas (Figura 13), ou seja, o estudo da relação espacial pela função K de Ripley de duas espécies em conjunto observa-se que o comportamento aleatório da distribuição espacial das *Araucariaceae* se combina com algumas famílias para demonstrar associação entre as mesmas. Isso ocorre entre as *Araucariaceae* e as *Aquifoliaceae*,

*Lauraceae* e *Myrtaceae*. No caso das *Lauraceae* isso ocorre a partir dos 7,5 m e para as outras duas famílias botânicas a janela de visualização observa associação a partir dos 15 m, aproximadamente.

Por outro lado as famílias *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* e *Sapindaceae* apresentaram completa independência espacial com as *Araucariaceae*, ou seja, não formam grupos associados e tampouco observa-se repulsão entre estas famílias botânicas. Acreditamos que isso se deva ao menor número de indivíduos destas famílias botânicas produzindo distâncias maiores até as *Araucariaceae*.

Figura 13 - Função K de Ripley e envelope de simulação, para associação espacial entre as *Araucariaceae* e as demais famílias botânicas na parcela 1539 em 2001.



Fonte: Autor.

#### 4.1.3 Análise Espacial por Geoestatística

A variável utilizada para a análise espacial por geoestatística foi a distância da árvore mais próxima da família em questão a cada uma das araucárias existentes na parcela em cada ano de análise.

#### 4.1.3.1 Estatística Descritiva dos dados de 2001

A Tabela 4 mostra a análise descritiva para o ano de 2001 das distâncias entre as árvores de cada família às *Araucariaceae* (97 árvores).

A distância média entre as árvores das outras famílias e as *Araucariaceae* varia de 4,360 m para as *Myrtaceae* a 8,690 m para as *Sapindaceae*. Pode-se observar que as duas famílias mais abundantes na área de estudos, *Myrtaceae* (169 indivíduos) e *Lauraceae* (96 indivíduos), foram as que possuem menor distância média, 4,360 m e 5,772 m, respectivamente, e para as demais famílias as distâncias médias foram superiores a 7,200 m.

Comparando estas distâncias médias (Tabela 4) com o processo pontual observamos que as menores distâncias médias (*Myrtaceae*, *Lauraceae* e *Aquifoliaceae*) correspondem aos resultados de associação entre estas famílias e as *Araucariaceae* (Figura 13). Por outro lado as maiores distâncias médias (*Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* e *Sapindaceae*) apresentaram resultados de completa independência espacial na análise por processo pontual (Figura 13).

Tabela 4 - Estatísticas descritivas dos valores de distância das árvores mais próximas às *Araucariaceae* na parcela 1539 em 2001.

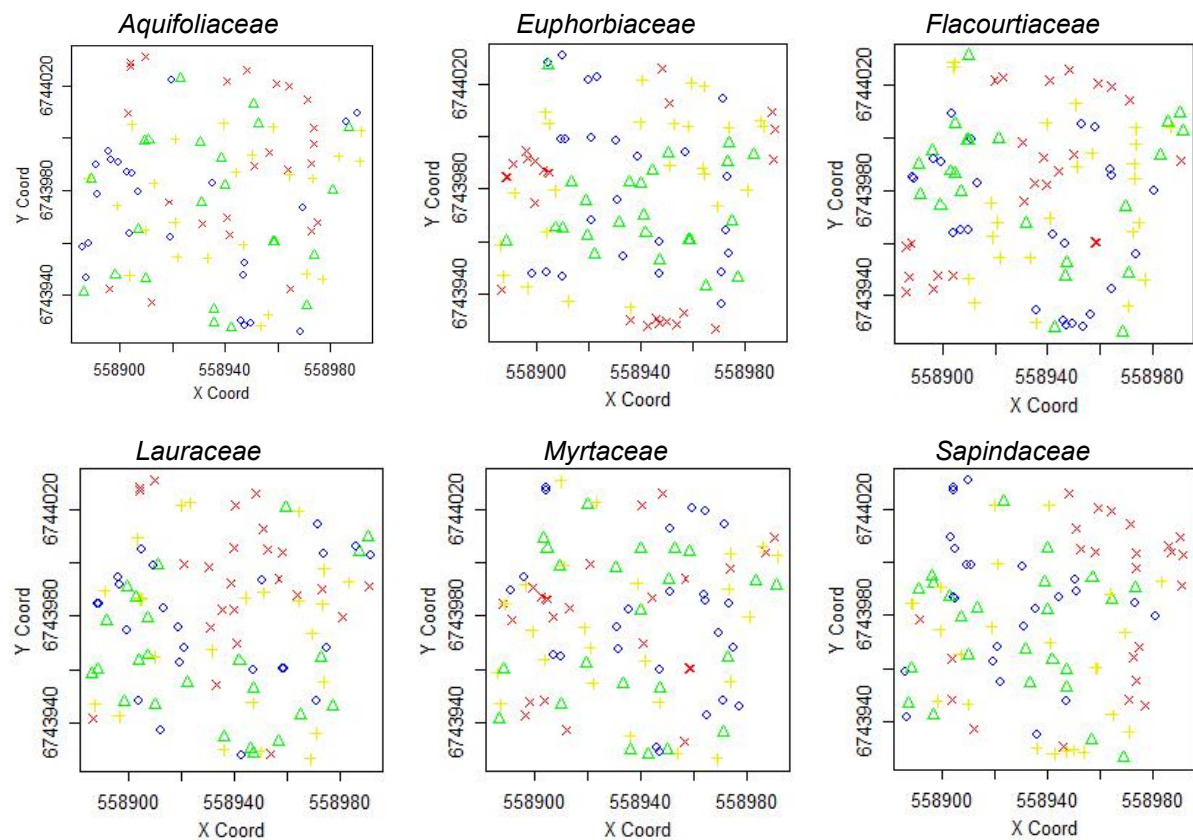
Estatística	Aquif	Euph	Flac	Laur	Myrt	Sap
Valor Mínimo (m)	1,300	0,922	0,632	0,510	0,728	1,166
1º Quartil (m)	4,080	3,862	5,119	3,301	1,879	3,522
Mediana (m)	6,139	7,131	7,032	5,263	4,022	6,602
Média (m)	7,201	8,027	8,568	5,772	4,360	8,690
3º Quartil (m)	10,150	11,300	11,090	7,877	6,325	11,880
Valor Máximo (m)	18,320	19,520	27,210	16,780	12,050	29,920
Desvio Padrão (m)	4,103	5,178	5,203	3,419	2,758	6,898
Variância (m <sup>2</sup> )	16,835	26,809	27,072	3,693	7,604	47,589
Coefficiente de Variação (%)	56,975	64,502	60,729	59,247	63,248	79,384

Legenda: Aquif = *Aquifoliaceae*; Euph = *Euphorbiaceae*; Flac = *Flacourtiaceae*; Laur = *Lauraceae*; Myrt = *Myrtaceae*; Sap = *Sapindaceae*. Fonte: Autor.

O desvio padrão e o coeficiente de variação também acompanharam a análise realizada no parágrafo anterior com valores maiores para as distâncias das famílias botânicas *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* e *Sapindaceae* e valores menores para as famílias botânicas *Aquifoliaceae*, *Lauraceae* e *Myrtaceae*.

Como o objetivo de observar se existe tendência espacial nos dados em estudo foi realizado no software R (R CORE TEAM, 2015) a distribuição espacial dos quartis de cada família botânica conforme mostra a Figura 14.

Figura 14 - Distribuição espacial dos quartis da variável distância (m) da árvore mais próxima de cada *Araucariaceae* por família botânica na parcela 1539 em 2001.



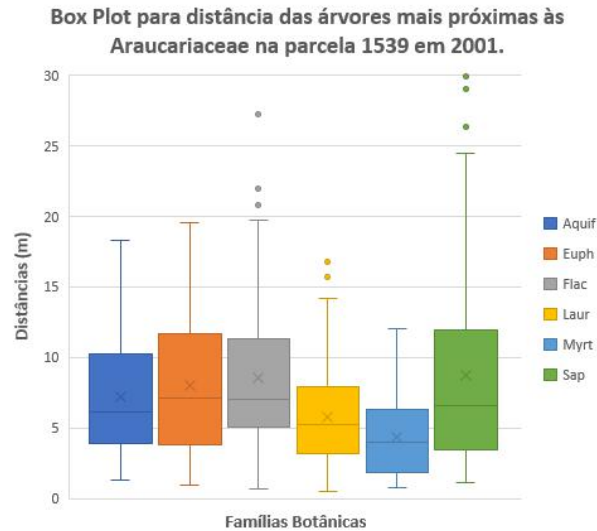
Legenda:  $\diamond$ : Valor Mínimo ao 1º Quartil;  $\triangle$ : 1º Quartil à Mediana;  $+$ : Mediana ao 3º Quartil;  $\times$ : 3º Quartil ao Valor Máximo. Fonte: Autor.

Observou-se que não existe concentração de valores baixos, médios ou altos representados nos quartis da distribuição em áreas específicas do espaço amostral. Isso nos indica que em uma análise variográfica podemos utilizar o pressuposto de isotropia nos dados para as seis famílias botânicas estudadas.

A Figura 15 mostra o boxplot para a variável distância das árvores mais próximas às *Araucariaceae* na parcela 1539 em 2001. Para as famílias botânicas *Flacourtiaceae*, *Lauraceae* e *Sapindaceae* não são observados nenhum ponto fora do limite de 1,5 vezes a distância interquartil somada ou diminuída do último quartil e do primeiro quartil, respectivamente. Para as outras famílias botânicas observa-se distâncias que podem ser consideradas *outliers* dos dados, no entanto considera-se uma baixa incidência deste tipo de dado e, portanto os mesmos foram mantidos para a realização da estimação clássica do semivariograma.



Figura 15 - Gráfico box plot para os dados obtidos na parcela 1539 em 2001.



Fonte: Autor.

#### 4.1.3.2 Análise Semivariográfica

A Tabela 5 mostra o número de pares obtidos no processo de cálculo de cada semivariância na análise variográfica sobre a variável de estudo para ano de 2001.

Tabela 5 - Número de pares utilizados para calcular o semivariograma em 2001.

Máxima Distância	Número de pares por ponto do semivariograma												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Hmax100% (124,46m)	105	319	411	555	606	585	566	512	421	337	151	67	19
Hmax90% (112,02m)	87	269	373	480	520	539	543	510	447	390	285	125	65
Hmax80% (99,57m)	74	208	311	385	470	497	452	487	445	405	344	293	157
Hmax70% (87,13m)	59	163	264	295	373	419	426	398	420	406	366	325	288
Hmax60% (74,68m)	42	105	209	237	285	332	363	372	326	374	366	316	313
Hmax50% (62,23m)	28	83	147	191	180	250	275	294	287	322	277	312	295

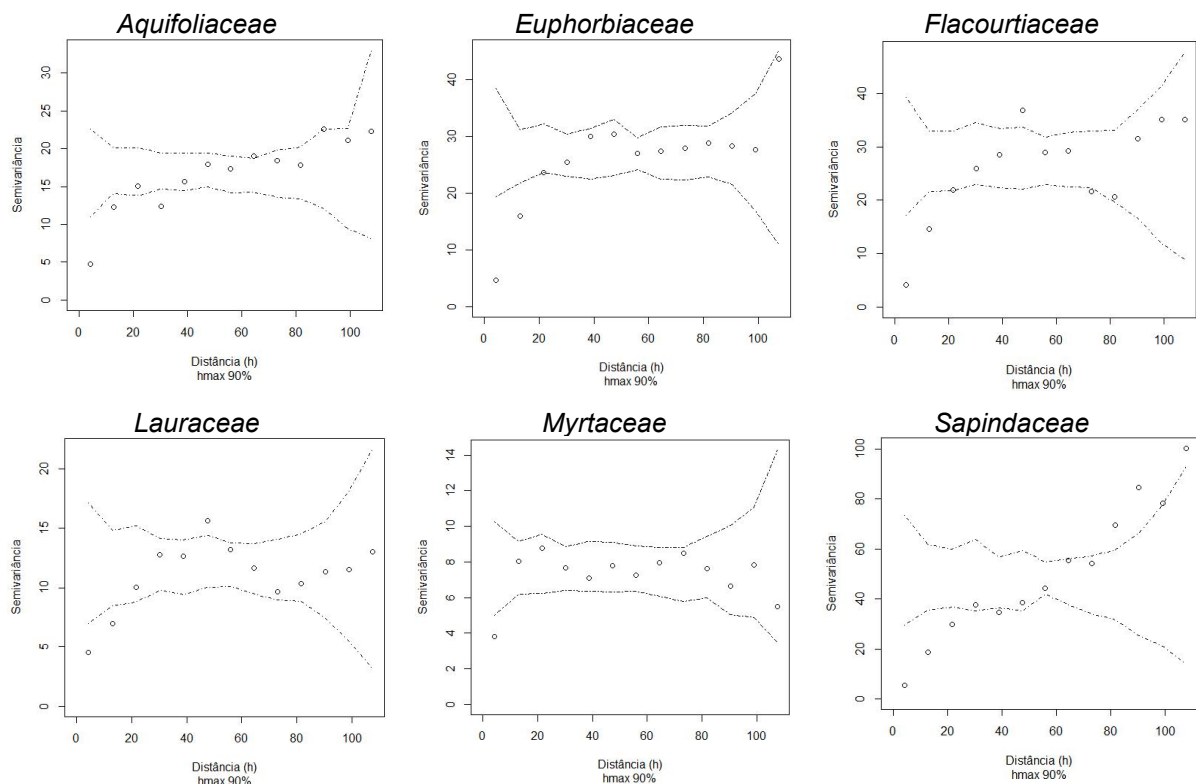
Legenda: Hmax = Distância máxima entre os pontos. Fonte: Autor.

Para a escolha do melhor semivariograma a ser ajustado aos modelos teóricos utilizou-se a análise visual dos mesmos em que o número de pares nunca seja menor que 30 para todas as semivariâncias calculadas em cada lag. Assim utilizou-se como padrão 112,02 m de distância máxima (Hmax90%) para todas as análises de 2001.

A Figura 16 mostra os envelopes de simulação para cada uma das famílias em estudo no ano de 2001. A família *Myrtaceae* foi a que apresentou quase todo o variograma experimental dentro do envelope demonstrando independência espacial.

Já as *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* e *Lauraceae* apresentam dependência espacial nos primeiros *lags* e posteriormente os pontos contidos dentro do envelope. Para as *Aquifoliaceae* e as *Sapindaceae* além de haver dependência espacial nas distâncias menores, observa-se pontos fora do envelope nas maiores distâncias, o que provavelmente produz ajustes com grande alcance, ou seja, estabilidade da variância com distâncias aquém dos limites espaciais da área de estudos.

Figura 16 - Envelopes de dependência espacial para as famílias em estudo na parcela 1539 em 2001, utilizando 90% da distância máxima entre as árvores.



Fonte: Autor.

#### 4.1.3.3 Ajustes dos Modelos Teóricos ao Semivariograma Experimental

Os Modelos Teóricos Esférico, Exponencial e Gaussiano foram ajustados aos semivariogramas empíricos pelo método clássico, utilizando como critério de peso o número de pares e a distância máxima de 112,02 m.

A Tabela 6 mostra os valores de ajuste semivariográfico obtidos, a Figura 17 os modelos teóricos ajustados e a Tabela 7 mostra os resultados da validação cruzada com a estimativa do valor no ponto medido.

Tabela 6 - Ajustes dos Modelos Teóricos aos semivariogramas empíricos para cada família em análise na parcela 1539 em 2001.

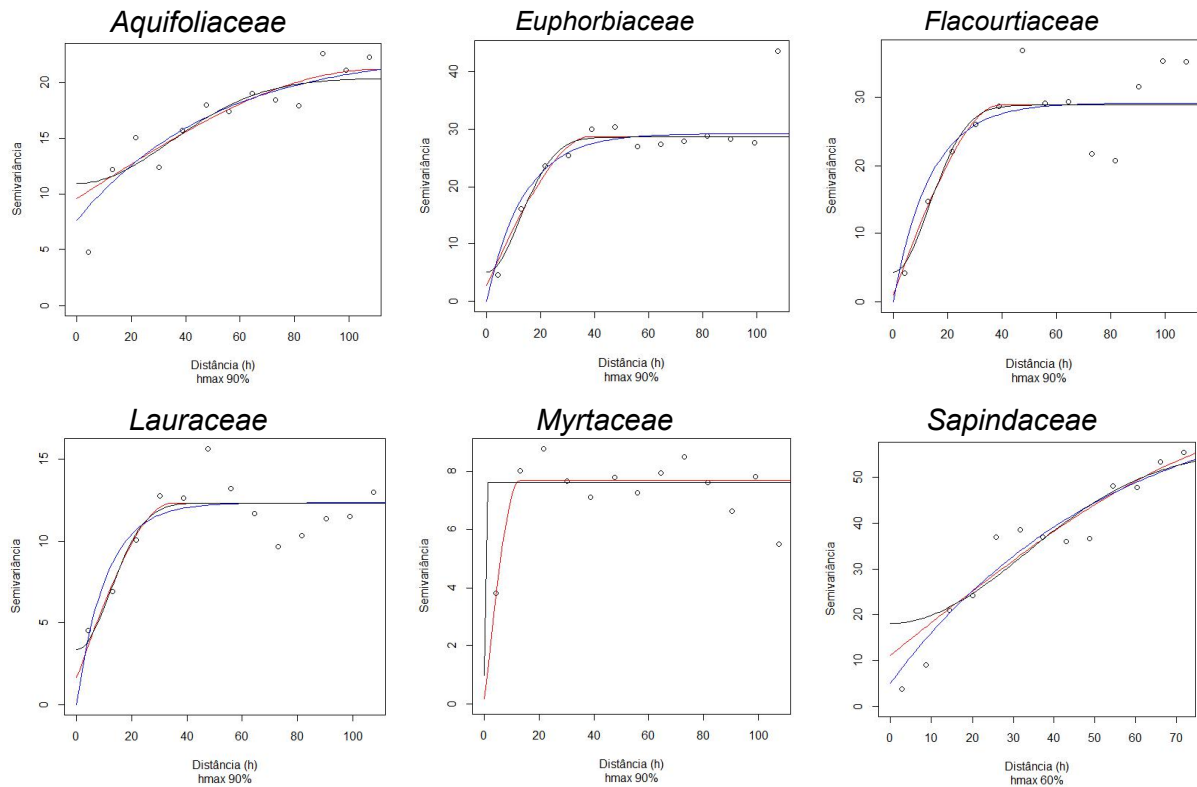
Família	Modelo	C0	C1	C0+C1	a	DE	IDE	SQ
<i>Aquifoliaceae</i>	Sph	9,6171	11,5538	21,1709	111,0881	54,57	20,47	10.682,65
	Exp	7,6370	15,2343	22,8713	152,4317	66,61	21,11	9.796,90
	Gaus	10,9599	9,4225	20,3824	83,3216	46,23	23,30	11.892,23
<i>Euphorbiaceae</i>	Sph	2,7123	26,0340	28,7463	38,6006	90,56	16,68	22.134,65
	Exp	0,0000	29,2565	29,2565	41,5161	100,00	21,13	24.967,85
	Gaus	5,0583	23,5844	28,6427	30,4240	82,34	20,27	22.475,25
<i>Flacourtiaceae</i>	Sph	1,0525	27,8298	28,8823	39,6690	96,36	23,01	93.662,29
	Exp	0,0000	29,1413	29,1413	40,8775	100,00	20,80	105.174,20
	Gaus	4,3578	24,4829	28,8407	32,4129	84,89	24,75	94.428,47
<i>Lauraceae</i>	Sph	1,6343	10,6883	12,3226	34,4201	86,74	17,97	12.071,80
	Exp	0,0000	12,3510	12,3510	32,0256	100,00	16,30	13.995,51
	Gaus	3,3390	9,0061	12,3451	29,7313	72,95	17,55	12.198,23
<i>Myrtaceae</i>	Sph	0,1682	7,5242	7,6924	12,8672	97,81	7,58	1.705,93
	Exp	0,9616	6,6576	7,6192	0,0001	87,38	0,00	2.998,45
	Gaus	0,9616	6,6576	7,6192	0,0001	87,38	0,00	2.998,45
<i>Sapindaceae</i>	Sph	11,1174	49,5916	60,7090	104,4102	81,69	30,63	63.144,18
	Exp	5,0171	65,3188	70,3359	161,8361	92,87	29,44	57.302,01
	Gaus	18,0278	38,2720	56,2998	79,5203	67,98	34,26	82.760,93

Onde: C0 = Efeito Pepita; C1 = Contribuição; C0+C1 = Patamar; a = Alcance em metros; DE = Dependência Espacial em Porcentagem proposto por Biondi et al. (1994); IDE = Índice de Dependência Espacial em porcentagem proposto por Seidel e Oliveira (2016); SQ = Soma de Quadrados; Sph = Modelo Esférico; Exp = Modelo Exponencial; Gaus = Modelo Gaussiano. Fonte: Autor.

A escolha do modelo para os procedimentos de krigagem ordinária pontual analisou os melhores resultados de 14 estatísticas relacionadas ao ajuste variográfico e a validação cruzada.

Para a família botânica *Aquifoliaceae* o modelo Exponencial teve oito melhores resultados, seguido do modelo Gaussiano com seis e nenhuma estatística favorável para o modelo Esférico. Podemos ressaltar que a DE foi moderada para os três modelos, enquanto que o IDE apresentou dependência espacial forte. Ao observarmos os gráficos do processo pontual marcado bivariado (Figura 13) e os ajustes variográficos (Figura 17), podemos inferir para a primeira análise a agregação aparece acima dos 15 metros coincidindo com os melhores ajustes dos modelo teóricos com a semivariância entre os 40 e 70m de distância entre os pontos. No entanto, verificamos na validação cruzada que o coeficiente de determinação foi baixo, entre 0,2280 (Gaus) e 0,3637 (Exp).

Figura 17 - Modelos teóricos ajustados para os dados da parcela 1539 em 2001.



Legenda: Linha Vermelha - Esférico; Linha Azul - Exponencial; Linha Preta - Gaussiano. Fonte: Autor.

As *Euphorbiaceae* apresentaram como melhor ajuste o modelo Exponencial com 10 estatísticas favoráveis, onde se destaca um baixo efeito pepita (0,0), uma contribuição (29,26) bem estruturada e boa ascendência até o alcance de (30,42 m), IDE (21,13%) e DE (100%) fortes, uma grande estabilidade da variância acima do alcance e um coeficiente de determinação alto (0,77). Estes bons resultados geoestatísticos diferem do processo pontual marcado bivariado que produziu um gráfico mostrando que estas duas espécies estão em completa independência espacial.

As *Flacourtiaceae* tiveram comportamento semelhante às *Aquifoliaceae* com o Modelo Exponencial obtendo sete estatísticas favoráveis. No processo pontual marcado bivariado observamos uma forte independência espacial entre as *Flacourtiaceae* e as *Araucariaceae*, no entanto entre as distâncias aproximadas de 17 a 23m uma leve associação se apresenta, coincidindo com uma grande inclinação ascendente da contribuição espacial do ajuste variográfico, ou seja, dependência espacial e bom ajuste para os três modelos utilizados.

Tabela 7 - Estatísticas de Validação Cruzada dos dados Originais X Preditos para os modelos teóricos ajustados para a parcela 1539 em 2001.

Família	Modelo	EM	DP <sub>EM</sub>	$\overline{ER}$	S <sub>ER</sub>	EA	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Adj.
<b>Aquifoliaceae</b>	Sph	0,0197	1,6889	0,0029	0,9067	276,6908	0,3009	0,2936
	Exp	0,0321	1,6433	0,0048	0,9005	261,9428	0,3637	0,3570
	Gaus	0,0085	1,7321	0,0012	0,9293	291,0245	0,2280	0,2199
<b>Euphorbiaceae</b>	Sph	0,0486	1,3749	0,0068	0,7612	183,3627	0,7657	0,7633
	Exp	0,0268	1,3568	0,0036	0,7163	178,5841	0,7700	0,7675
	Gaus	0,0855	1,3829	0,0133	0,7987	185,5090	0,7610	0,7585
<b>Flacourtiaceae</b>	Sph	-0,0876	1,4996	-0,0189	0,8821	218,1415	0,6924	0,6891
	Exp	-0,0681	1,4621	-0,0154	0,7783	207,3749	0,7113	0,7083
	Gaus	-0,0085	1,5559	-0,0017	0,9375	234,8196	0,6490	0,6453
<b>Lauraceae</b>	Sph	0,0253	1,3431	0,0046	0,8890	174,9696	0,5444	0,5396
	Exp	0,0503	1,3042	0,0089	0,8239	164,9903	0,5678	0,5632
	Gaus	0,0332	1,3673	0,0068	0,9021	181,3344	0,5194	0,5143
<b>Myrtaceae</b>	Sph	0,0336	1,3205	0,0054	0,8513	169,1291	0,3555	0,3487
	Exp	0,0000	1,5176	0,0000	0,9111	223,4046	1,0000	1,0000
	Gaus	0,0000	1,5176	0,0000	0,9111	223,4046	1,0000	1,0000
<b>Sapindaceae</b>	Esf	-0,0008	1,5370	0,0000	0,7395	229,1622	0,8324	0,8307
	Exp	0,0137	1,3931	0,0019	0,7107	188,2549	0,8769	0,8757
	Gaus	0,0064	1,7378	0,0008	0,8157	292,9421	0,7059	0,7028

Onde: EM = Média do Erro; DP<sub>EM</sub> = Desvio Padrão dos Erros;  $\overline{ER}$  = Erro Médio Reduzido; S<sub>ER</sub> = Desvio Padrão dos Erros Reduzidos; EA = Erro Absoluto; R<sup>2</sup> = Coeficiente de Determinação; R<sup>2</sup> Adj. = Coeficiente de Determinação Ajustado; Sph = Modelo Esférico; Exp = Modelo Exponencial; Gaus = Modelo Gaussiano. Fonte: Autor.

As *Lauraceae* e *Araucariaceae* apresentaram forte associação no processo pontual marcado bivariado e também no ajuste variográfico, onde o modelo Exponencial também foi o escolhido devido a obter sete estatísticas favoráveis, destacando-se a forte IDE (16,30%) e DE (100%). Observa-se que na validação cruzada o coeficiente de determinação apresentou valor mediano (R<sup>2</sup> Exp = 0,5678).

As *Myrtaceae* apresentaram associação no processo pontual marcado bivariado com as *Araucariaceae* a partir dos 20 m, aproximadamente. Isso não ocorreu com o ajuste variográfico que apresentou resultados de efeito pepita puro, com apenas um ponto de semivariância abaixo do patamar. Isso pode ter acontecido pela pouca amplitude dos valores encontrados para distância entre as duas famílias já que são as duas mais populosas da parcela florestal estudada. Destaca-se o antagonismo encontrado entre a forte DE (97,81%) e o moderado IDE (7,58%) para o modelo Esférico e a forte DE (87,38%) e o fraco IDE (0,00%) para os modelos

Exponencial e Gaussiano, devido ao fato que o IDE considerar também o efeito do alcance (SEIDEL e OLIVEIRA, 2014, 2016).

O processo pontual marcado e a análise variográfica apresentaram resultados opostos para a relação existente entre *Araucariaceae* e *Sapindaceae*. O primeiro apresentou completa independência espacial e o segundo forte dependência espacial para todos os modelos pelo IDE (acima de 29%). Apesar dos altos alcances encontrados, 161,84 m para o modelo Exponencial selecionado (8 estatísticas favoráveis) o coeficiente de determinação da validação cruzada foi o mais alto verificado (0,8769).

#### 4.1.3.4 Interpolação espacial por krigagem ordinária pontual

Para melhorar a visualização dos resultados utilizou-se uma reclassificação da imagem resultante da interpolação em quatro classes utilizando os quartis naturais da distribuição dos dados. A Tabela 8 mostra os valores dos limites de classe em cada uma das famílias botânicas analisadas.

Tabela 8 – Limites das classes utilizados nos mapas obtidos por krigagem ordinária pontual para a variável de estudo na parcela 1539 em 2001.

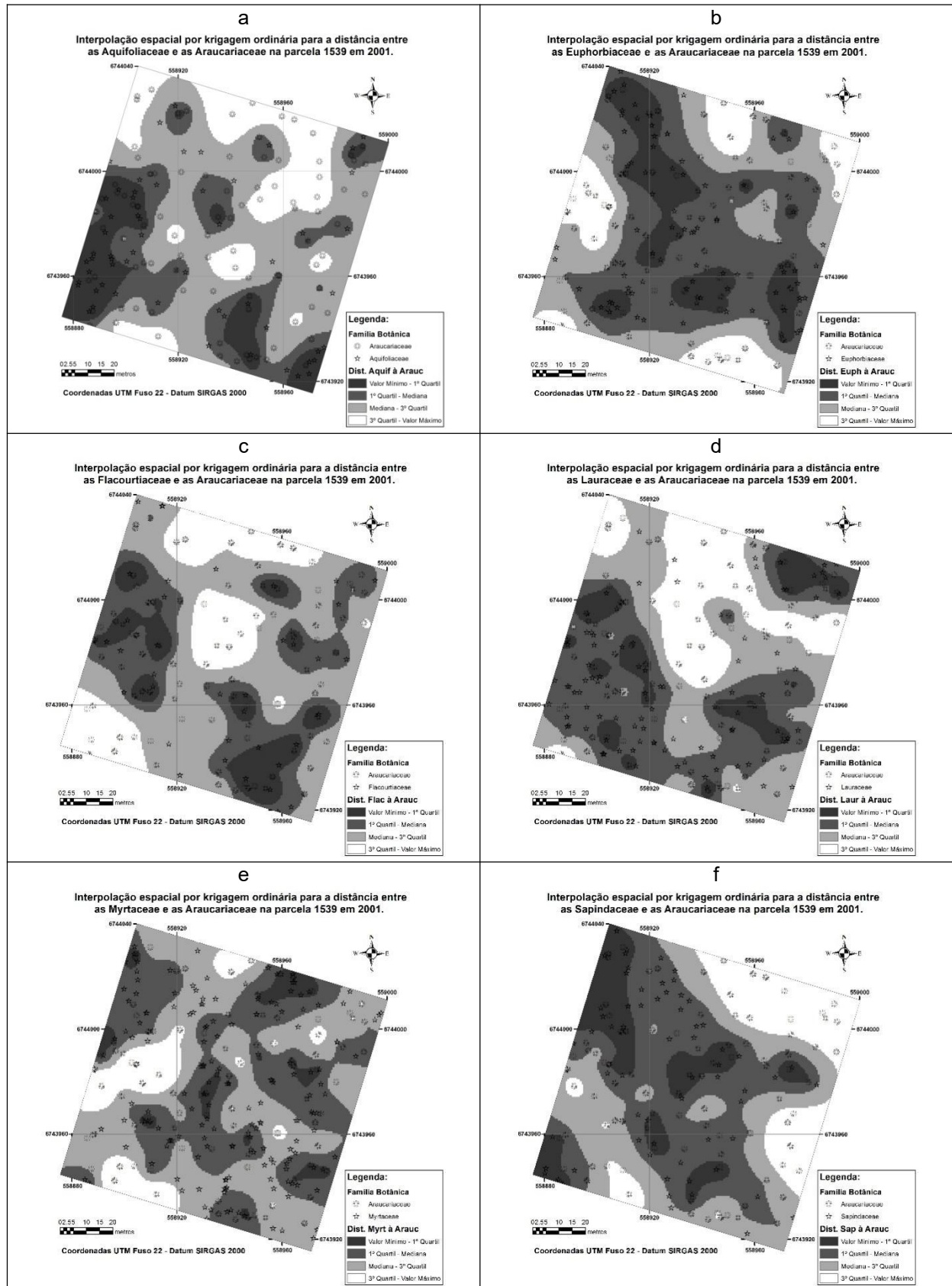
Classe	Aquif	Euph	Flac	Laur	Myrt	Sap
Valor Mínimo - 1º Quartil	1,33 - 5,54	1 - 5,49	0,83 - 7,15	0,55 - 4,72	0,8 - 3,47	1,29 - 4,37
1º Quartil - Mediana	5,54 - 7,48	5,49 - 8,09	7,15 - 8,98	4,72 - 6,01	3,47 - 4,24	4,37 - 7,64
Mediana - 3º Quartil	7,48 - 10,13	8,09 - 10,16	8,98 - 10,83	6,01 - 7,26	4,24 - 5,14	7,64 - 13,53
3º Quartil - Valor Máximo	10,13 - 18,18	10,16 - 19,41	10,83 - 27,07	7,26 - 16,44	5,14 - 11,88	13,53 - 32,39

Legenda: Aquif = *Aquifoliaceae*; Euph = *Euphorbiaceae*; Flac = *Flacourtiaceae*; Laur = *Lauraceae*; Myrt = *Myrtaceae*; Sap = *Sapindaceae*. Fonte: Autor.

A Figura 18 mostra os resultados da krigagem ordinária pontual considerando a média da variável constante na área de estudos, usando todos os vizinhos possíveis para os modelos teóricos ajustados, para cada relação entre as *Araucariaceae* e as famílias botânicas.

A Tabela 9 mostra as estatísticas básicas dos mapas estimados. Observa-se o fenômeno intrínseco da krigagem ordinária pontual de suavização dos dados quando comparados com os valores de entrada (Tabela 4), ou seja, amplitude de valores menor.

Figura 18 - Interpolação espacial por krigagem ordinária para a distância entre as famílias botânicas e as *Araucariaceae* na parcela 1539 em 2001.



Legenda: a) *Aquifoliaceae*; b) *Euphorbiaceae*; c) *Flacourtiaceae*; d) *Lauraceae*; e) *Myrtaceae*; f) *Sapindaceae*.  
Fonte: Autor.

Tabela 9 – Estatísticas descritivas dos valores de distância das árvores mais próximas às *Araucariaceae* obtidos por krigagem ordinária na parcela 1539 em 2001.

<b>Estatística</b>	<b>Aquif</b>	<b>Euph</b>	<b>Flac</b>	<b>Laur</b>	<b>Myrt</b>	<b>Sap</b>
Valor Mínimo (m)	1,33	1,00	0,83	0,55	0,80	1,29
1º Quartil (m)	5,54	5,49	7,15	4,72	3,47	4,37
Mediana (m)	7,48	8,09	8,98	6,01	4,24	7,64
Média (m)	7,94	9,14	9,45	6,13	4,37	10,32
3º Quartil (m)	10,13	10,16	10,83	7,26	5,14	13,53
Valor Máximo (m)	18,18	19,41	27,07	16,44	11,88	32,39
Desvio Padrão (m)	3,17	3,33	3,53	2,09	1,51	8,06
Variância (m <sup>2</sup> )	10,08	11,08	12,48	4,38	2,29	65,00
Coeficiente de Variação (%)	39,98	40,90	37,38	34,10	34,65	78,13

Legenda: Aquif = *Aquifoliaceae*; Euph = *Euphorbiaceae*; Flac = *Flacourtiaceae*; Laur = *Lauraceae*; Myrt = *Myrtaceae*; Sap = *Sapindaceae*. Fonte: Autor.

A Tabela 10 apresenta o quadro e áreas do fatiamento realizado nas imagens pelos quartis naturais da distribuição de valores para o ano de 2001.

Tabela 10 – Quadro de áreas das krigagens de 2001 na parcela 1539.

<b>Família Botânica</b>	<b>Valor Mínimo - 1º Quartil</b>		<b>1º Quartil - Mediana</b>		<b>Mediana - 3º Quartil</b>		<b>3º Quartil - Valor Máximo</b>	
	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>(%)</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>(%)</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>(%)</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	<b>(%)</b>
<i>Aquifoliaceae</i>	1.397,99	13,98	2.089,07	20,89	4.524,40	45,24	1.988,54	19,89
<i>Euphobiaceae</i>	1.703,11	17,03	4.132,45	41,32	2.606,86	26,07	1.557,58	15,58
<i>Flacourtiaceae</i>	1.202,19	12,02	2.417,74	24,18	4.348,99	43,49	2.031,07	20,31
<i>Lauraceae</i>	1.125,21	11,25	3.394,26	33,94	3.207,61	32,08	2.272,92	22,73
<i>Myrtaceae</i>	527,28	5,27	3.777,77	37,78	4.573,61	45,74	1.121,34	11,21
<i>Sapindaceae</i>	1.538,25	15,38	3.615,72	36,16	2.851,52	28,52	1.994,52	19,95

Fonte: Autor.

As *Aquifoliaceae* e *Flacourtiaceae* foram as famílias botânicas em que as distâncias abaixo da mediana corresponderam na krigagem os menores percentuais de áreas, 34,87% e 36,20% respectivamente, enquanto que as *Euphorbiaceae* (58,36%) e as *Sapindaceae* (51,54%) tem a maioria dos pontos estimados com valores abaixo da mediana.

As famílias mais abundantes na área de estudos *Lauraceae* e *Myrtaceae* tiveram bastante equilíbrio, assim como as *Sapindaceae*, com 45,19% e 42,05% dos valores estimados abaixo da mediana e 54,81% e 56,95% acima da mediana, respectivamente, sendo que estas duas famílias são as que possuem menor amplitude total dos dados.

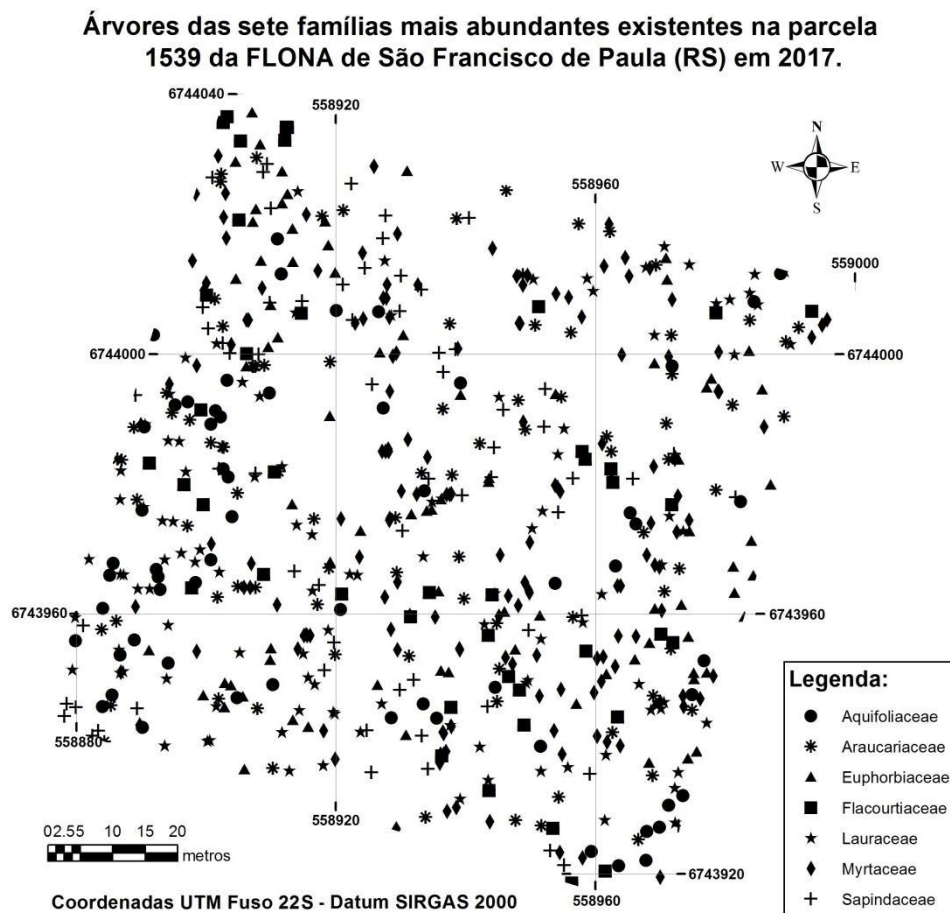


## 4.2 Análise dos dados obtidos no Inventário Florestal de 2017

### 4.2.1 Distribuição Espacial das Árvores Medidas

A Figura 19 apresenta a distribuição espacial das árvores medidas das sete famílias mais abundantes nesta unidade amostral (*Aquifoliaceae*, *Araucariaceae*, *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae*, *Myrtaceae*, *Lauraceae* e *Sapindaceae*), sendo elas coincidentes com às obtidas no inventário florestal de 2001.

Figura 19 - Distribuição espacial das árvores medidas na parcela 1539 em 2017.



Fonte: Autor.

A Tabela 11 apresenta um resumo estatístico da variável número de indivíduos, da Circunferência a Altura do Peito (cm) e da Área Basal (m<sup>2</sup>) de todos os indivíduos mensurados no ano de 2017 na parcela 1539.

Tabela 11 – Principais estatísticas das árvores medidas na parcela 1539 em 2017.

Famílias / Gêneros	N	Proporção do N (%)	Desnidade (Árv./m <sup>2</sup> )	CAP Médio (cm)	Somatório da AB (m <sup>2</sup> )	Proporção de AB (%)	PC
<i>Aquifoliaceae</i>	60	8,77	0,0060	57,65	1,838	4,44	6,61
<i>Ilex</i>	60	8,77	0,0060	57,65	1,838	4,44	6,61
<i>Araucariaceae</i>	88	12,87	0,0088	170,29	23,433	56,62	34,75
<i>Araucaria</i>	88	12,87	0,0088	170,29	23,433	56,62	34,75
<i>Euphorbiaceae</i>	85	12,43	0,0085	44,53	1,568	3,79	8,11
<i>Sapium</i>	3	0,44	0,0003	33,60	0,027	0,07	0,25
<i>Sebastiania</i>	82	11,99	0,0082	44,93	1,541	3,72	7,86
<i>Flacourtiaceae</i>	43	6,29	0,0043	40,09	0,572	1,38	3,83
<i>Casearia</i>	34	4,97	0,0034	38,87	0,420	1,02	2,99
<i>Xylosma</i>	9	1,32	0,0009	44,69	0,152	0,37	0,84
<i>Lauraceae</i>	108	15,79	0,0108	60,94	3,789	9,16	12,47
<i>Cinnamomum</i>	2	0,29	0,0002	84,05	0,132	0,32	0,31
<i>Cryptocarya</i>	46	6,73	0,0046	53,66	1,242	3,00	4,86
<i>Nectandra</i>	41	5,99	0,0041	65,63	1,626	3,93	4,96
<i>Ocotea</i>	19	2,78	0,0019	65,98	0,790	1,91	2,34
<i>Myrtaceae</i>	154	22,51	0,0154	60,40	5,435	13,13	17,82
<i>Acca</i>	1	0,15	0,0001	37,50	0,011	0,03	0,09
<i>Blepharocalyx</i>	79	11,55	0,0079	71,98	3,921	9,48	10,51
<i>Calyptrocalyx</i>	1	0,15	0,0001	46,30	0,017	0,04	0,09
<i>Campomanesia</i>	31	5,41	0,0037	51,25	0,846	2,04	3,29
<i>Eugenia</i>	10	1,46	0,0010	48,11	0,202	0,49	0,98
<i>Myrceugenia</i>	17	2,49	0,0017	43,60	0,279	0,67	1,58
<i>Myrcianthes</i>	1	0,15	0,0001	31,70	0,008	0,02	0,08
<i>Myrrhinium</i>	1	1,02	0,0007	46,33	0,125	0,30	0,22
<i>Siphoneugenia</i>	1	0,15	0,0001	56,30	0,025	0,06	0,10
<i>Sapindaceae</i>	65	9,50	0,0065	60,30	2,178	5,26	7,38
<i>Allophylus</i>	1	0,15	0,0001	46,00	0,017	0,04	0,09
<i>Cupania</i>	17	2,49	0,0017	49,11	0,364	0,88	1,68
<i>Matayba</i>	47	6,87	0,0047	64,64	1,798	4,34	5,61
Outras	81	11,84	0,0081	57,66	2,570	6,21	9,03
<b>Total</b>	<b>684</b>	<b>100,00</b>	<b>0,0684</b>	<b>70,80</b>	<b>41,383</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Onde: N = Número de Indivíduos; Árv. = Árvore; AB = Área Basal (área da base da árvore obtida com o CAP); CAP = Circunferência a Altura do Peito (1,30m), PC: Porcentagem de Cobertura. Fonte: Autor.

No Inventário Florestal de 2017 foram encontradas na parcela 1539 684 árvores, o que corresponde a 28 indivíduos a menos que em 2001, ou seja, um decréscimo de 3,93% no número de indivíduos e acréscimo de 0,58m<sup>2</sup>.árvore<sup>-1</sup> de espaço para crescimento (4,13%).

Foram medidas árvores de 22 famílias botânicas, três a menos que em 2001 e as sete famílias mais abundantes contabilizaram 603 indivíduos, mesmo número que em 2001, mas não as mesmas árvores. Assim as 81 árvores de outras 15 famílias botânicas representam 11,84% dos indivíduos da parcela e totalizam apenas 6,21% da área basal da parcela com 2,570m<sup>2</sup>.

As *Araucariaceae* diminuíram de 97 para 88 indivíduos, mas mantiveram sua importância na composição florística, com 57,62% da área basal (23,433 m<sup>2</sup>) com apenas 12,87% dos indivíduos. O CAP médio das *Araucariaceae* aumentou significativamente (7,47%) passando de 158,46 cm em 2001 para 170,29 cm em 2017, provavelmente causado pelo não ingresso de árvores jovens no CAP mínimo considerado e incremento em circunferência das árvores que permaneceram durante o lapso de tempo entre as duas medições.

As *Myrtaceae* continuam sendo a família botânica mais abundante com 154 indivíduos (22,51%), com o maior número de gêneros botânicos (nove) e com 13,13% da área basal da floresta. As demais famílias botânicas (*Aquifoliaceae*, *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae*, *Lauraceae* e *Sapindaceae*) detêm 52,78% dos indivíduos e 24,03% da área basal.

Analisando a Porcentagem de Cobertura observamos que as *Araucariaceae* (34,75%), *Myrtaceae* (17,82%) e as *Lauraceae* (12,47%) são as famílias botânicas mais importantes correspondendo a aproximadamente 65% da cobertura florestal na área de estudos. Comparativamente ao ano 2001, dentre as 7 famílias botânicas analisadas as *Myrtaceae* e as *Araucariaceae* perderam PC na ordem de 4,24% e 2,05%, respectivamente, principalmente devido a diminuição do número de indivíduos destas.

Da mesma forma que em 2001 os procedimentos adotados para a avaliação da distribuição espacial das famílias botânicas na FOM por meio dos processos pontuais e da variável utilizada nos procedimentos geoestatísticos não foram prejudicados pela retirada da análise dos 81 indivíduos das outras famílias botânicas.

#### 4.2.2 Processo Pontual

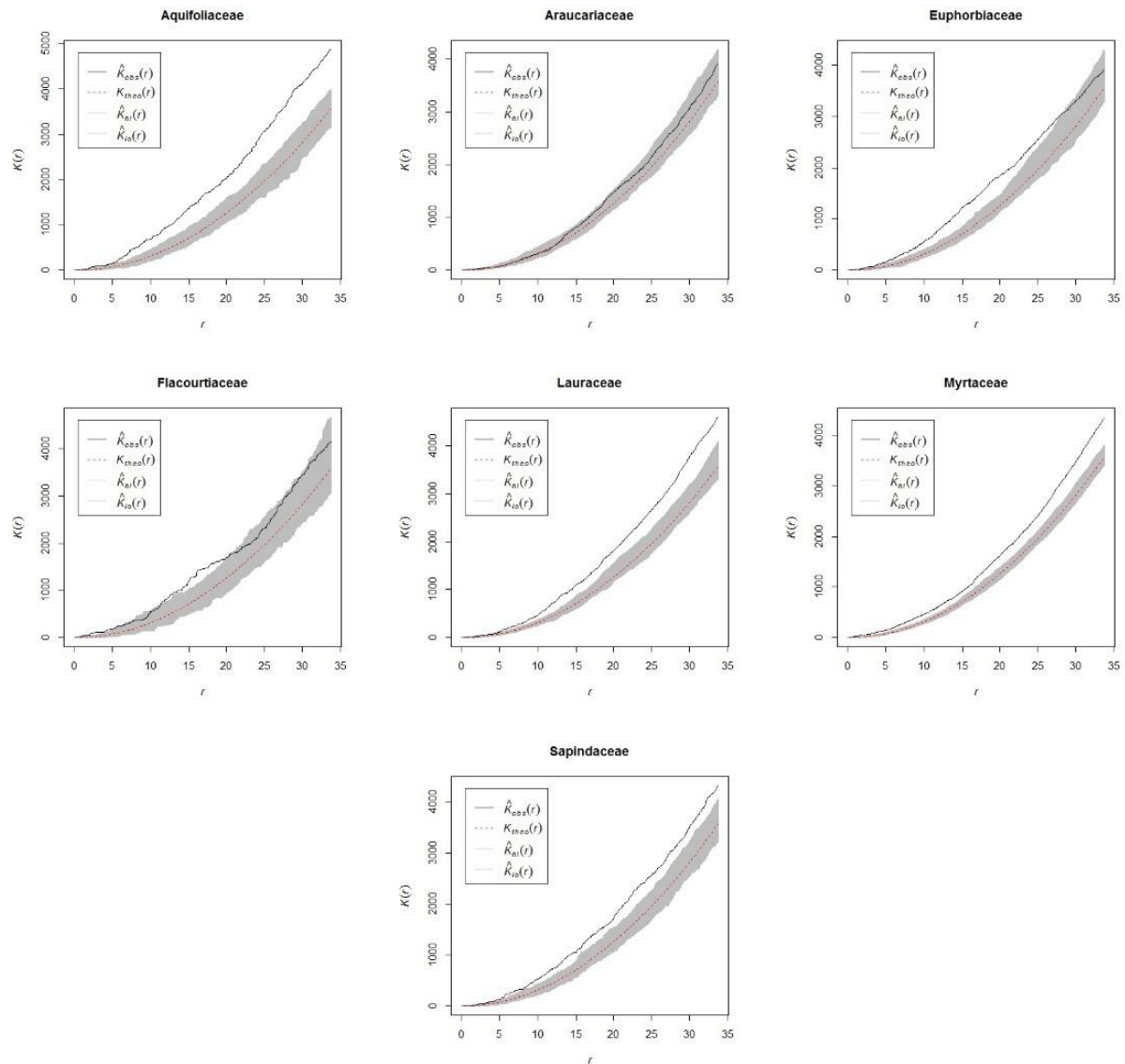
A Figura 20 mostra o resultado do estudo espacial por processo pontual para as famílias botânicas em estudo na parcela 1539 em 2017.

Para o ano de 2017 apenas as *Araucariaceae* apresentaram completa aleatoriedade espacial pela Função K de Ripley, contrariamente o acontecido em 2001 quando as *Flacourtiaceae* acompanharam a primeira. Nesta análise as *Flacourtiaceae* apresentam agrupamentos em distâncias até 4 m e entre 12 e 20 m. Para as *Aquifoliaceae*, *Lauraceae*, *Myrtaceae* e *Sapindaceae* a agregação aparece em torno de 5 m e se estende por toda a janela de análise. As *Euphorbiaceae*

também diferiram seu comportamento em relação ao ano de 2001, já que nesta análise aparece aleatoriedade espacial acima de 27 m.

O comportamento das *Araucariaceae* contraria novamente o encontrado por Silvestre et al. (2012) e concorda com o encontrado para gênero *Ilex* (*Aquifoliaceae*) pelos mesmos autores. As famílias botânicas *Lauraceae* e *Myrtaceae* não modificaram seu comportamento coincidindo com os trabalhos de Nascimento et al. (2001) e Canalez et al. (2006), respectivamente.

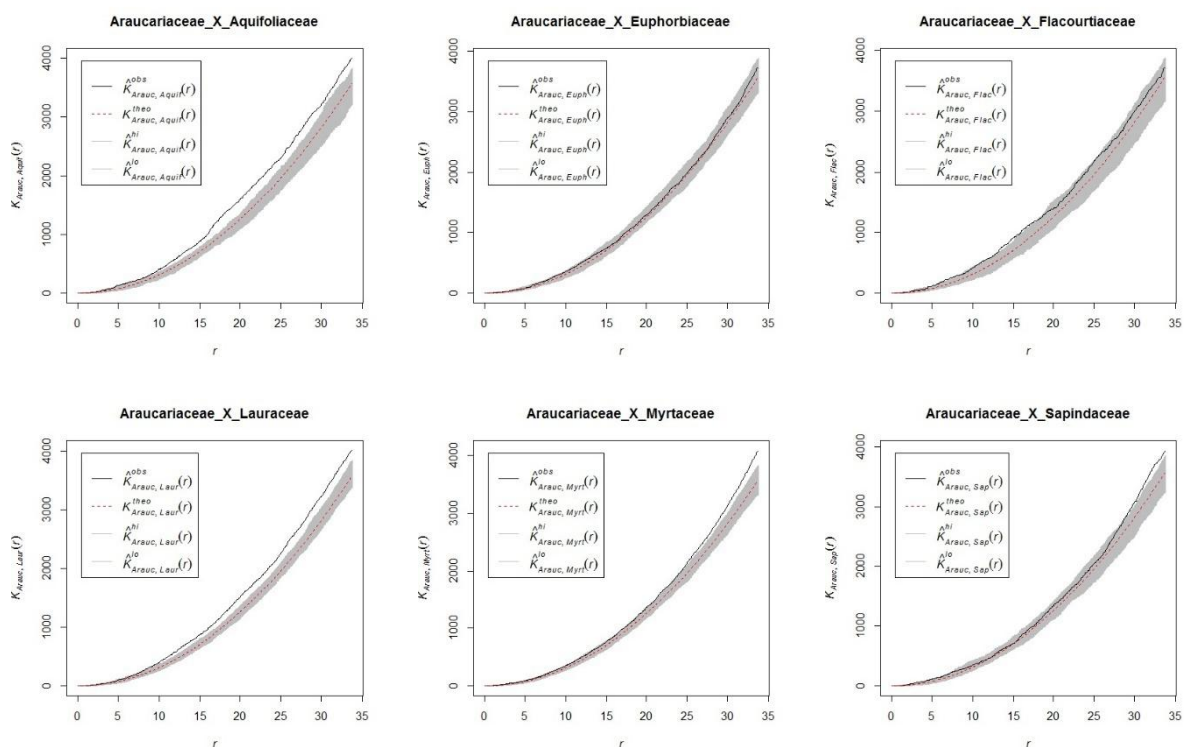
Figura 20 - Função K de Ripley e envelope de simulação, para a distribuição espacial, das famílias botânicas na parcela 1539 em 2017.



Fonte: Autor.

Quando analisa-se o processo pontual marcado categórico com duas marcas (Figura 21), observa-se que entre as *Araucariaceae* e as famílias botânicas *Aquifoliaceae*, *Lauraceae*, *Myrtaceae* e *Sapindaceae* apresentam-se em associação com início da mesma em diferentes distâncias de análise. No caso das *Aquifoliaceae* e *Lauraceae* isso ocorre a partir dos 10 m, as *Myrtaceae* a partir dos 25 m e para as *Sapindaceae* depois dos 30m.

Figura 21 - Função K de Ripley e envelope de simulação, para associação espacial entre as *Araucariaceae* e as demais famílias botânicas na parcela 1539 em 2017.



Fonte: Autor.

As *Euphorbiaceae* foram a única família com independência espacial em todas as distâncias de análise, já que para as *Flacourtiaceae* aparece uma leve associação com as *Araucariaceae* entre 13 e 18 m, diferentemente do ocorrido em 2001. Igualmente ao que aconteceu com 2001 não houve casos de repulsão entre famílias botânicas na análise de 2017.

Isso demonstra que, o ingresso e/ou a saída de árvores da floresta, modifica a distribuição espacial das mesmas e principalmente a relação entre os indivíduos aí existentes.

#### 4.2.3 Análise Espacial por Geoestatística

A variável utilizada para a análise espacial por geoestatística é a distância da árvore mais próxima da família em questão a cada uma das araucárias existentes na parcela em cada ano de análise.

##### 4.2.3.1 Estatística Descritiva dos dados de 2017

A Tabela 12 mostra a análise descritiva para o ano de 2017 das distâncias entre as árvores de cada família às *Araucariaceae* existentes na parcela que totalizam 88 indivíduos.

As *Myrtaceae* continuam sendo a família botânica com menores distâncias às *Araucariaceae* com média de 4,677 m enquanto que as *Flacourtiaceae* tomaram o lugar das *Sapindaceae* com média de 8,549 m. As menores distâncias médias foram das *Myrtaceae* (4,677 m) e das *Lauraceae* (5,312 m) com 154 e 108 indivíduos na parcela.

Tabela 12 - Estatística descritiva dos valores de distância das árvores mais próximas às *Araucariaceae* na parcela 1539 em 2017.

Estatística	Aquif.	Euph.	Flac.	Laur.	Myrt.	Sap.
Valor Mínimo (m)	1,260	0,922	0,632	0,510	0,699	1,166
1º Quartil (m)	3,601	3,916	4,391	2,835	2,289	3,054
Mediana (m)	7,682	6,026	6,369	4,814	4,426	6,190
Média (m)	8,169	7,890	8,549	5,312	4,677	7,757
3º Quartil (m)	11,140	10,860	12,020	7,392	6,372	10,430
Valor Máximo (m)	27,100	24,520	27,210	14,180	12,870	27,330
Desvio Padrão (m)	5,486	5,670	5,958	3,087	2,963	6,065
Variância (m <sup>2</sup> )	30,100	32,145	35,496	9,531	8,779	36,782
Coeficiente de Variação (%)	67,157	71,863	69,689	58,120	63,356	78,189

Legenda: Aquif. = *Aquifoliaceae*; Euph. = *Euphorbiaceae*; Flac. = *Flacourtiaceae*; Laur. = *Lauraceae*; Myrt. = *Myrtaceae*; Sap. = *Sapindaceae*. Fonte: Autor.

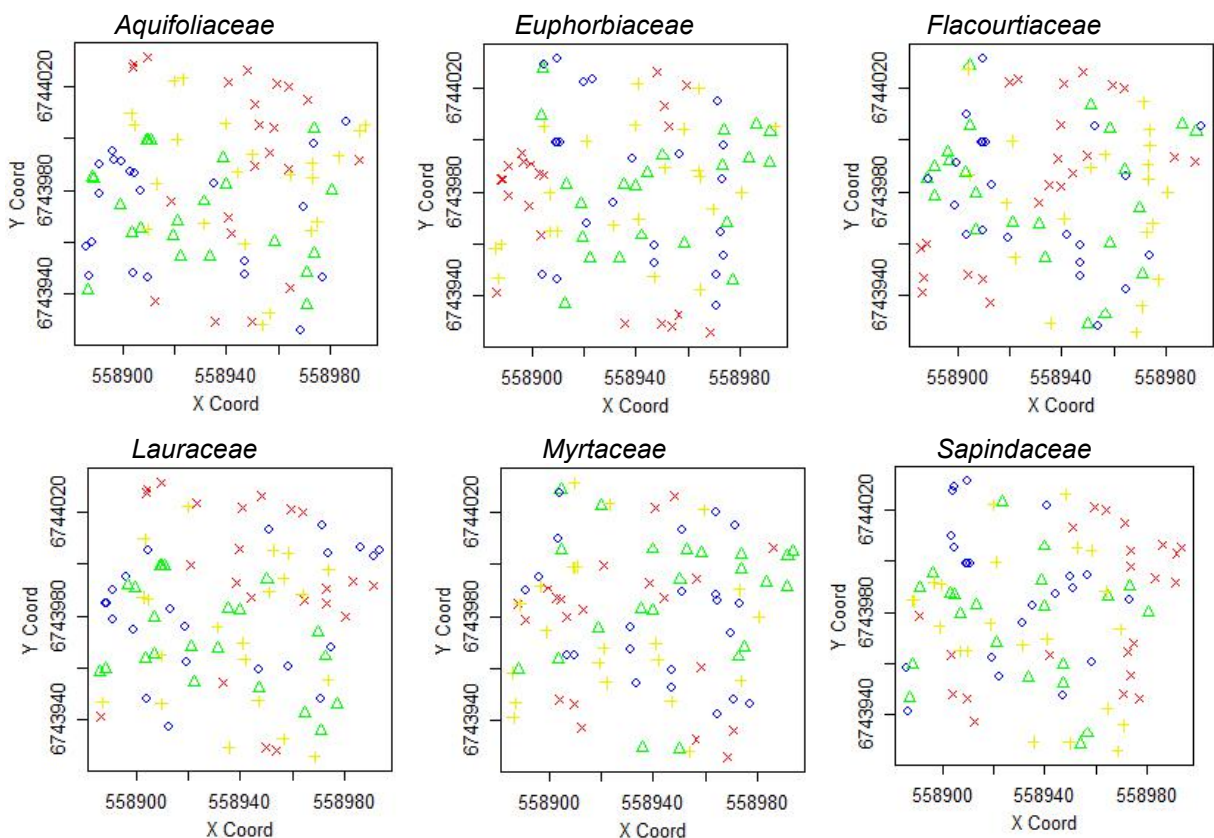
As menores distâncias médias das *Lauraceae* e *Myrtaceae* concordam com processo pontual bivariado com associações a pequenas distâncias. As *Aquifoliaceae* aumentaram em quase 1 m a distância média (de 7,201 m para 8,169 m), no entanto ainda apresentam associação em pequenas distâncias do processo pontual bivariado. As *Sapindaceae* diminuíram sua distância média com as *Araucariaceae* e passaram de apresentar completa independência espacial a mostrar associação a maiores distâncias (30 m). As *Euphorbiaceae* e as

*Flacourtiaceae* tiveram pequenas mudanças nas distâncias médias às *Araucariaceae*, no entanto apenas a primeira demonstrou completa independência espacial.

O coeficiente de variação teve incremento considerável para as famílias *Aquifoliaceae* (17,87%), *Euphorbiaceae* (11,41%) e *Flacourtiaceae* (14,75%) quando comparado com os dados de 2001, enquanto que as demais famílias mantiveram os valores muito próximos, sendo -1,90% para as *Lauraceae*, 0,17% para as *Myrtaceae* e -1,46% para as *Sapindaceae*. O desvio padrão da variável de trabalho aumentou para as famílias *Aquifoliaceae*, *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* e *Myrtaceae*, enquanto que diminuiu para as *Lauraceae* e *Sapindaceae*.

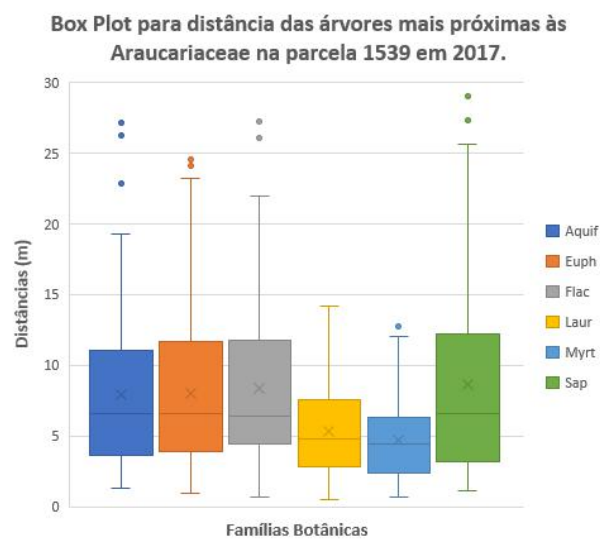
A Figura 22 mostra a distribuição espacial dos quartis da variável em estudo para cada família botânica. Ao observarmos esta distribuição espacial percebe-se que não existem fortes concentrações dos quartis na área de estudo o que permite utilizar o pressuposto de isotropia nos dados.

Figura 22 - Distribuição espacial dos quartis da variável distância (m) da árvore mais próxima de cada *Araucariaceae* por família botânica na parcela 1539 em 2017.



Ao analisar o boxplot dos dados da variável de trabalho (Figura 23) para o ano de 2017 observa-se que a Família *Lauraceae* não teve pontos acima do limite de 1,5 vezes a distância interquartil acima do 3º quartil da distribuição. As demais famílias tiveram 1, 2 ou 3 indivíduos com distâncias maiores que o limite acima especificado, o que vai ao encontro do aumento do Coeficiente de Variação para as famílias botânicas *Aquifoliaceae*, *Euphorbiaceae* e *Flacourtiaceae*. O mesmo não aconteceu para as *Lauraceae* e *Sapindaceae*.

Figura 23 - Gráfico box plot para os dados obtidos na parcela 1539 em 2017.



Fonte: Autor.

#### 4.2.3.2 Análise Semivariográfica

A Tabela 13 mostra o número de pares que foram utilizados para o cálculo de cada semivariância na análise semivariográfica. Considerando os critérios de escolha da distância máxima a ser utilizada, adotamos Hmax90% para todas as análises de 2017, ou seja, 112,13 m.

A Figura 24 mostra os envelopes de simulação para cada uma das famílias em estudo no ano de 2017, em que obtiveram-se resultados parecidos aos de 2001. As *Myrtaceae* apresentaram quase todo o variograma experimental dentro do envelope de simulação demonstrando independência espacial, já as *Aquifoliaceae* e as *Sapindaceae* apresentaram os primeiros lags fora do envelope e também pontos do variograma fora do envelope em maiores distâncias.



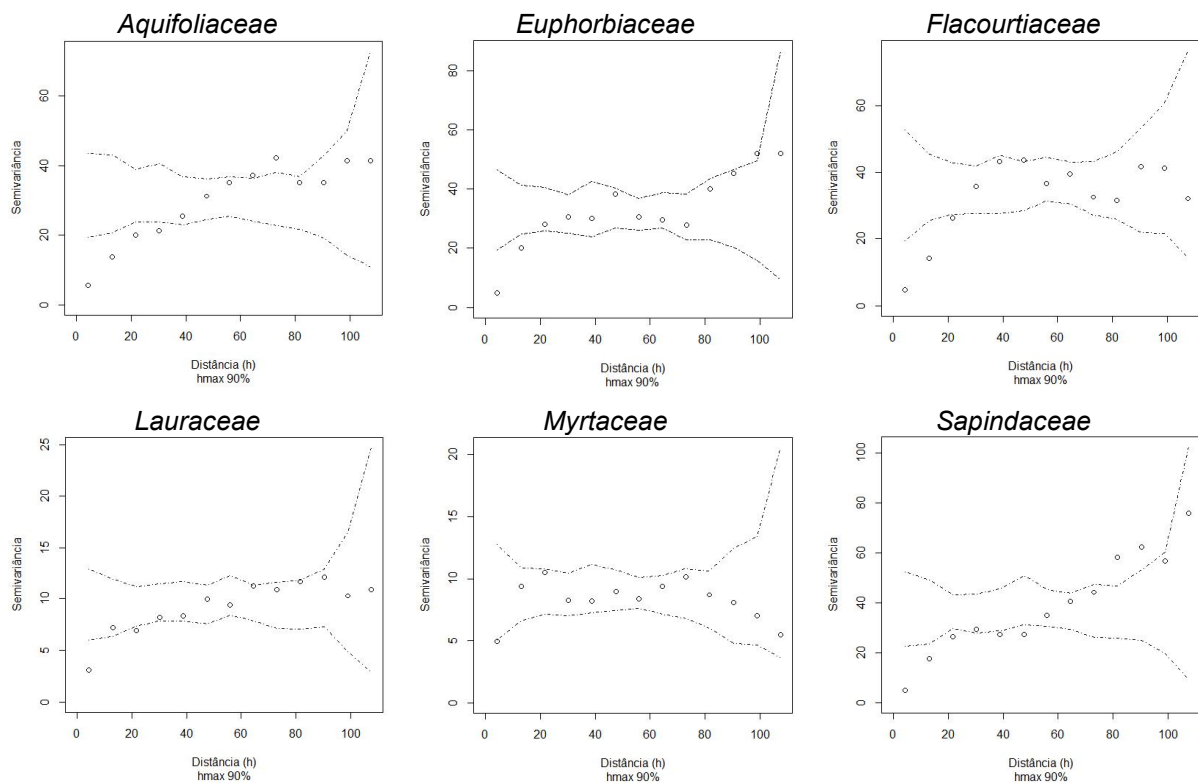
Tabela 13 - Número de pares utilizados para calcular o semivariograma em 2017.

Máxima Distância	Número de pares por ponto do semivariograma												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Hmax100% (124,46m)	87	278	352	465	513	481	461	420	322	267	116	49	15
Hmax90% (112,02m)	71	235	320	402	438	449	457	414	354	300	228	94	47
Hmax80% (99,57m)	59	182	268	326	396	419	371	407	367	322	262	233	122
Hmax70% (87,13m)	46	141	230	255	316	345	369	319	358	323	301	244	234
Hmax60% (74,68m)	31	86	192	199	247	277	301	317	271	315	299	260	250
Hmax50% (62,23m)	22	70	128	166	154	216	232	243	243	273	227	262	242

Legenda: Hmax = Distância máxima entre os pontos. Fonte: Autor.

As *Euphorbiaceae* e as *Sapindaceae* demonstram dependência espacial nesta análise com boa ascendência da contribuição fora do envelope e estabilidade da variância dentro do envelope, enquanto que as *Lauraceae* tiveram um comportamento parecido as *Myrtaceae* com apenas dos pontos do variograma fora do envelope de simulação.

Figura 24 - Envelopes de dependência espacial para as famílias em estudo na parcela 1539 em 2017, utilizando 90% da distância máxima entre as árvores.



Fonte: Autor.

#### 4.2.3.3 Ajustes dos Modelos Teóricos ao Semivariograma Experimental

Os Modelos Teóricos (Esférico, Exponencial e Gaussiano) foram ajustados aos semivariogramas empíricos pelo método clássico, utilizando como critério de peso o número de pares e a distância máxima de 112,13 m. A Tabela 14 mostra os valores de ajuste variográfico obtidos, a Figura 25 os modelos teóricos ajustados e a Tabela 15 mostra os resultados da validação cruzada com a estimativa do valor no ponto medido.

Tabela 14 - Ajustes dos Modelos Teóricos aos semivariogramas empíricos para cada família em análise na parcela 1539 em 2017.

Família	Modelo	C0	C1	C0+C1	a	DE	IDE	SQ
<b>Aquifoliaceae</b>	Sph	4,1849	34,2781	38,4630	78,7575	89,12	33,42	17.883,52
	<b>Exp</b>	0,6630	43,9022	44,5652	121,3097	98,51	31,23	25.289,77
	Gaus	10,3976	28,8630	39,2606	71,8935	73,52	37,05	20.822,93
<b>Euphorbiaceae</b>	Sph	20,0991	50.586,5703	50.606,6694	326.639,3000	99,96	37,49	112.582,70
	<b>Exp</b>	20,0957	23.374,9452	23.395,0409	100.561,1940	99,91	31,67	112.584,30
	Gaus	25,3354	7.938,5518	7.963,8872	3.388,1650	99,68	50,24	117.016,20
<b>Flacourtiaceae</b>	Sph	0,0000	38,7041	38,7041	41,3729	100,00	24,93	61.579,37
	Exp	0,0000	39,3991	39,3991	46,7461	100,00	23,81	101.241,70
	<b>Gaus</b>	0,4961	38,2727	38,7688	33,1694	98,72	26,52	61.356,40
<b>Lauraceae</b>	Sph	4,7588	6,8670	11,6258	93,3474	59,07	22,15	1.547,61
	<b>Exp</b>	3,9912	9,1912	13,1824	151,2713	69,72	22,10	1.651,47
	Gaus	5,9357	5,8154	11,7511	83,2573	49,49	24,94	1.791,18
<b>Myrtaceae</b>	<b>Sph</b>	1,1970	7,6778	8,8748	12,7635	86,51	6,65	3.213,46
	Exp	1,0354	7,7658	8,8012	0,0001	88,24	0,00	4.296,63
	Gaus	1,0354	7,7658	8,8012	0,0001	88,24	0,00	4.296,63
<b>Sapindaceae</b>	Sph	8,5816	24.018,4737	24.027,0553	67.913,43	99,96	37,49	84.697,36
	<b>Exp</b>	8,5952	391.158,5231	391.167,1183	2.209.798,00	100,00	31,70	84.701,80
	Gaus	19,4033	255,7396	275,1429	377,65	92,95	46,85	63.564,18

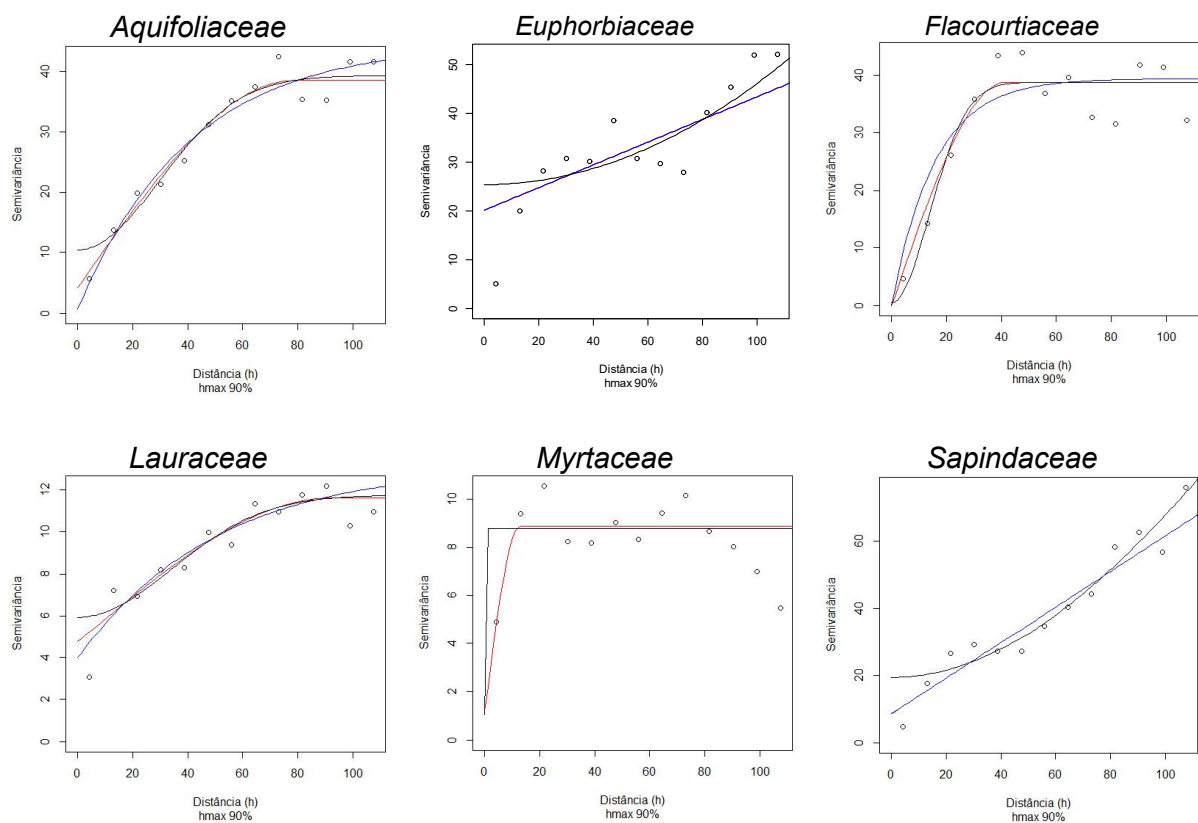
Onde: C0 = Efeito Pepita; C1 = Contribuição; C0+C1 = Patamar; a = Alcance em metros; DE = Dependência Espacial em Porcentagem proposto por Biondi et al (1004); IDE = Índice de Dependência Espacial em porcentagem proposto por Seidel e Oliveira (2016); SQ = Soma de Quadrados; Sph = Modelo Esférico; Exp = Modelo Exponencial; Gaus = Modelo Gaussiano. Fonte: Autor.

O modelo exponencial foi escolhido para as *Aquifoliaceae* devido a um melhor ajuste com o variograma experimental, com alta DE e IDE, e principalmente devido aos bons resultados de validação cruzada, destacando o  $R^2$  de 0,7408. O bom

ajuste variográfico coincide com o processo pontual marcado bivariado que apresentou associação entre esta família botânica e as *Araucariaceae*.

A independência espacial entre *Araucariaceae* e *Euphorbiaceae* no processo pontual marcado bivariado também pode ser percebido no ajuste variográfico. Ao utilizar-se o padrão Hmax90% nenhum modelo teórico conseguir ajustar-se adequadamente ao variograma experimental. Mesmo com a alta DE e IDE, o menor alcance encontrado foi de 7.963,8872 m (Gaussiano), incoerente com os dados de campo. No entanto, a validação cruzada produziu um coeficiente de determinação de 0,5865 (Exponencial) que pode estar relacionado com a boa relação entre os modelos teóricos e o variograma experimental entre os 10 e 70 m.

Figura 25 - Modelos teóricos ajustados para os dados da parcela 1539 em 2017.



[Legenda: Linha Vermelha - Esférico; Linha Azul - Exponencial; Linha Preta - Gaussiano. Fonte: Autor.

As *Flacourtiaceae* tiveram um bom ajuste variográfico visual, com incremento de semivariância até os 40 m aproximadamente, onde os três modelos teóricos testados obtiveram desempenho parecido com alcances entre 33,17 m (Gaus) e 46,45 m (Exp), DE e IDE altos e validação cruzada com  $R^2$  acima de 0,78 (Sph =

0,7839, Exp = 0,7827 e Gaus = 0,7885). O modelo escolhido foi o Gaussiano que obteve nove estatísticas favoráveis na análise. Estes resultados discordam do processo pontual marcado bivariado que demonstrou pequena associação entre 13 e 18 m de janela de visualização e no restante das distâncias completa independência espacial.

Tabela 15 - Estatísticas de Validação Cruzada dos dados Originais X Preditos para os modelos teóricos ajustados para a parcela 1539 em 2017.

Família	Modelo	EM	DP <sub>EM</sub>	ER	S <sub>ER</sub>	EA	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Adj.
<b>Aquifoliaceae</b>	Sph	0,0310	1,5399	0,0042	0,8596	208,6772	0,6942	0,6906
	Exp	0,0231	1,4700	0,0011	0,8573	190,1675	0,7408	0,7377
	Gaus	0,0331	1,7084	0,0045	0,9122	256,8543	0,5372	0,5319
<b>Euphorbiaceae</b>	Sph	0,0067	1,7679	0,0007	0,7965	275,0500	0,5864	0,5816
	Exp	0,0067	1,7678	0,0007	0,7965	275,0100	0,5865	0,5817
	Gaus	0,0181	2,1009	0,0018	0,9282	388,4196	0,0335	0,0223
<b>Flacourtiaceae</b>	Sph	0,0702	1,4561	0,0095	0,8192	186,5679	0,7839	0,7814
	Exp	0,1282	1,4598	0,0152	0,7276	187,5378	0,7827	0,7801
	Gaus	0,0263	1,4259	0,0029	1,2533	178,9244	0,7885	0,7861
<b>Lauraceae</b>	Sph	0,0159	1,3920	0,0030	0,8764	170,5038	0,3328	0,3251
	Exp	0,0187	1,3657	0,0036	0,8692	164,1329	0,3725	0,3652
	Gaus	0,0147	1,4587	0,0028	0,9088	187,2400	0,2083	0,1991
<b>Myrtaceae</b>	Sph	0,0222	1,3655	0,0022	0,8273	164,0826	0,4108	0,4039
	Exp	0,0000	1,5490	0,0000	0,8968	211,1599	1,0000	1,0000
	Gaus	0,0000	1,5490	0,0000	0,8968	211,1599	1,0000	1,0000
<b>Sapindaceae</b>	Sph	-0,0014	1,5862	0,0000	0,8128	221,4198	0,7552	0,7523
	Exp	-0,0014	1,5862	0,0000	0,8128	221,4953	0,7551	0,7522
	Gaus	0,0151	1,9800	0,0017	0,9303	344,9621	0,3655	0,3581

Onde: EM = Média do Erro; DP<sub>EM</sub> = Desvio Padrão dos Erros; ER = Erro Médio Reduzido; S<sub>ER</sub> = Desvio Padrão dos Erros Reduzidos; EA = Erro Absoluto; R<sup>2</sup> = Coeficiente de Determinação; R<sup>2</sup> Adj. = Coeficiente de Determinação Ajustado; Sph = Modelo Esférico; Exp = Modelo Exponencial; Gaus = Modelo Gaussiano. Fonte: Autor.

As *Lauraceae* apresentaram bom ajuste variográfico visual, mas com altos alcances (Sph = 93,35 m, Exp = 151,27 m e Gaus = 83,26 m). Na classificação de Biondi et al (1994) a DE para os três modelos foi moderada (Sph = 59,07%, Exp = 69,72% e Gaus = 49,49%), diferentemente da classificação proposta por Seidel e Oliveira (2016) que apresentou IDE alta (Sph = 22,15%, Exp = 22,10% e Gaus = 24,94%). Na validação cruzada os modelos apresentaram R<sup>2</sup> baixos (Sph = 0,3328, Exp = 0,3725 e Gaus = 0,2083). O modelo exponencial foi escolhido porque obteve

sete estatísticas favoráveis na análise. Estes modelos ajustados concordam com o processo pontual marcado bivariado que apresentou alta associação entre as *Araucariaceae* e as *Lauraceae*.

Assim como em 2001 as *Myrtaceae* apresentaram associação no processo pontual marcado bivariado com as *Araucariaceae* a partir dos 25m, aproximadamente, e o ajuste variográfico que apresentou resultados de efeito pepita puro, com apenas um ponto de semivariância abaixo do patamar estabelecido pelos modelos teóricos. Acredita-se que a baixa média de distâncias (4,677 m) e baixa amplitude da variável de trabalho tenha provocado este efeito. Destaca-se o antagonismo encontrado entre a forte DE (86,51%) e o fraco IDE (6,65%) para o modelo Esférico e a forte DE (88,24%) e o fraco IDE (0,00%) para os modelos Exponencial e Gaussiano. Mesmo assim, selecionou-se o modelo esférico para os procedimentos de interpolação espacial.

As *Sapindaceae* tiveram comportamento idêntico às *Aquifoliaceae* com alcances altíssimos (Tabela 14). A DE e o IDE foram altos para os 3 modelos e as estatísticas de validação cruzada foram mais favoráveis aos modelos esféricos e exponencial com valores muito próximos. Devido ao melhor ajuste visual e a um  $R^2 = 0,7551$  o modelo Exponencial foi selecionado. Os resultados discordam do processo pontual marcado bivariado que mostrou independência espacial entre as duas famílias botânicas (*Araucariaceae* e *Sapinaceae*) até os 30 m aproximadamente e mesmo sem encontrar-se estabilidade na semivariância os modelos passam pelos pontos do variograma com bons resultados na validação cruzada.

#### 4.2.3.4 Interpolação espacial por krigagem ordinária pontual

A Tabela 16 mostra os valores dos limites de classe utilizados para reclassificar os valores obtidos pelo processo de interpolação espacial por krigagem ordinária pontual em cada uma das famílias botânicas analisadas.

A Figura 26 mostra os resultados da krigagem ordinária pontual considerando a média constante na área de estudos, o uso de todos os vizinhos possíveis para os modelos teóricos selecionados para cada relação entre as *Araucariaceae* e as demais famílias botânicas no ano de 2017.

Tabela 16 – Limites das classes de distância (m) utilizados nos mapas obtidos por krigagem ordinária pontual para a variável de estudo na parcela 1539 em 2017.

Classe	Aquif	Euph	Flac	Laur	Myrt	Sap
Valor Mínimo - 1º Quartil	1,34 - 5,59	0,98 - 5,25	0,85 - 6,55	0,53 - 4,12	0,79 - 3,78	1,31 - 4,18
1º Quartil - Mediana	5,59 - 8,39	5,25 - 7,16	6,55 - 9,42	4,12 - 5,76	3,78 - 4,60	4,18 - 6,80
Mediana - 3º Quartil	8,39 - 11,68	7,16 - 11,51	9,42 - 13,31	5,76 - 7,56	4,60 - 5,61	6,80 - 12,02
3º Quartil - Valor Máximo	11,68 - 27,30	11,51 - 24,46	13,31 - 27,10	7,56 - 14,14	5,61 - 12,78	12,02 - 27,96

Legenda: Aquif = *Aquifoliaceae*; Euph = *Euphorbiaceae*; Flac = *Flacourtiaceae*; Laur = *Lauraceae*; Myrt = *Myrtaceae*; Sap = *Sapindaceae*. Fonte: Autor.

A Tabela 17 mostra os valores estatísticos básicos dos mapas krigados onde podemos observar a suavização dos dados provocados pelo processo geoestatístico ao compararmos os valores desta tabela com àqueles obtidos dos pontos amostrais, principalmente relacionado a amplitude total dos dados.

Tabela 17 – Estatísticas descritivas dos valores de distância (m) das árvores mais próximas às *Araucariaceae* obtidos por krigagem ordinária na parcela 1539 em 2017.

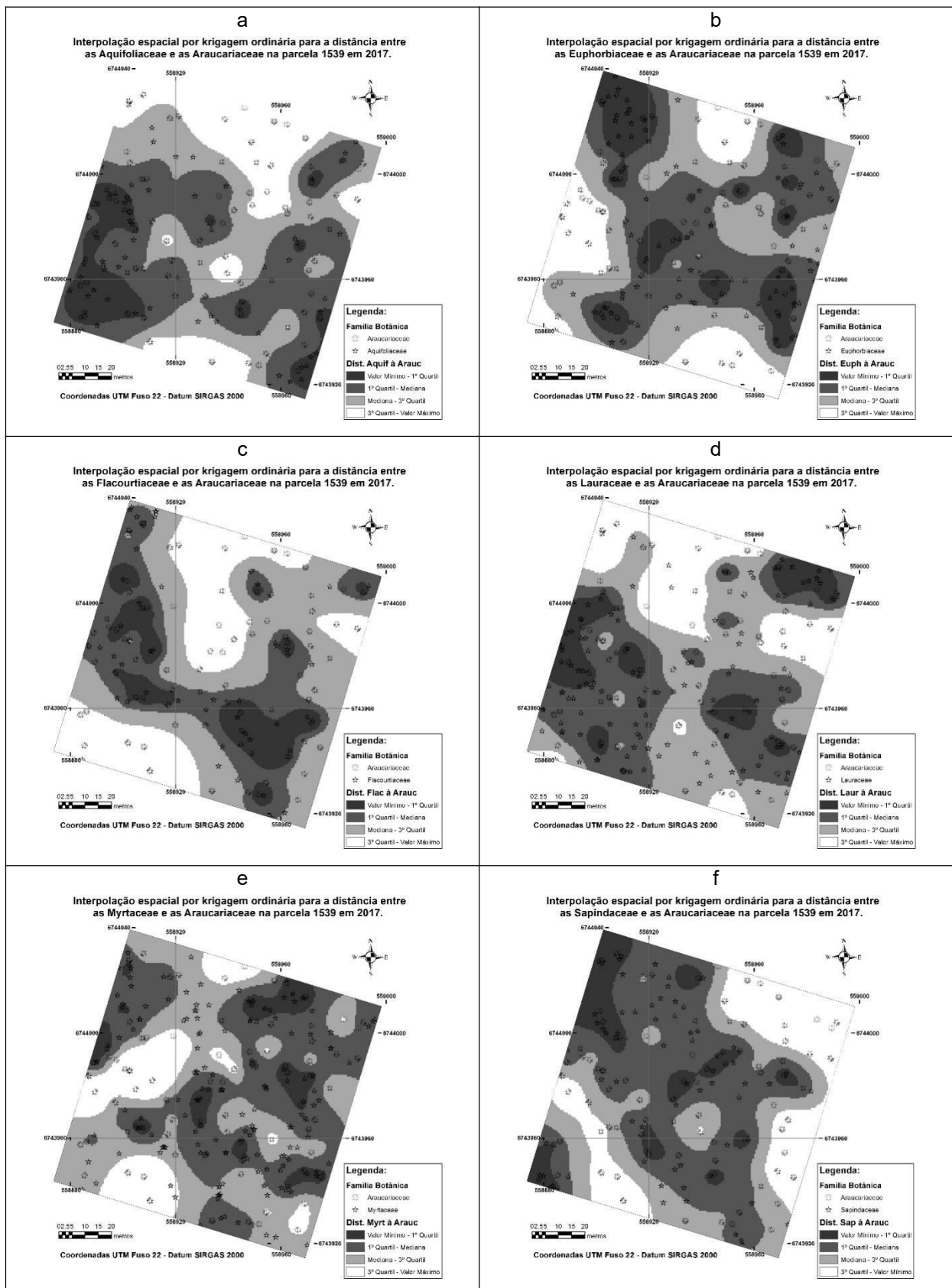
Estatística	Aquif.	Euph.	Flac.	Laur.	Myrt.	Sap.
Valor Mínimo (m)	1,34	0,98	0,85	0,53	0,79	1,31
1º Quartil (m)	5,59	5,25	6,55	4,12	3,78	4,18
Mediana (m)	8,39	7,16	9,42	5,76	4,60	6,80
Média (m)	9,20	8,65	10,29	5,99	4,75	9,04
3º Quartil (m)	11,68	11,51	13,31	7,56	5,61	12,02
Valor Máximo (m)	27,30	24,46	27,10	14,14	12,78	27,96
Desvio Padrão (m)	4,84	4,59	4,89	2,44	1,61	6,57
Variância (m <sup>2</sup> )	23,40	21,07	23,87	5,97	2,59	43,22
Coefficiente de Variação (%)	52,60	53,06	47,48	40,81	33,86	72,75

Legenda: Aquif = *Aquifoliaceae*; Euph = *Euphorbiaceae*; Flac = *Flacourtiaceae*; Laur = *Lauraceae*; Myrt = *Myrtaceae*; Sap = *Sapindaceae*. Fonte: Autor.

Observa-se nas Tabelas 17 e 12, que todas as médias da variável de trabalho aumentaram em relação aos dados originais, com uma relativa manutenção no desvio padrão. Isso provocou uma considerável diminuição nos valores do Coeficiente de Variação, com quase 50% de redução para as *Myrtaceae* (de 63,37% para 33,86%).

A Tabela 18 apresenta o quadro de áreas obtido pelo fatiamento realizado nas imagens pelos quartis naturais da distribuição de valores para o ano de 2017.

Figura 26 - Interpolação espacial por krigagem ordinária pontual para a distância entre as famílias botânicas e as *Araucariaceae* na parcela 1539 em 2017.



Legenda: a) *Aquifoliaceae*; b) *Euphorbiaceae*; c) *Flacourtiaceae*; d) *Lauraceae*; e) *Myrtaceae*; f) *Sapindaceae*. Fonte: Autor.

Tabela 18 – Quadro de áreas das krigagens de 2017 na parcela 1539.

Família Botânica	Valor Mínimo - 1º Quartil		1º Quartil - Mediana		Mediana - 3º Quartil		3º Quartil - Valor Máximo	
	m <sup>2</sup>	(%)	m <sup>2</sup>	(%)	m <sup>2</sup>	(%)	m <sup>2</sup>	(%)
<i>Aquifoliaceae</i>	1.089,00	10,89	3.790,07	37,90	2.922,88	29,23	2.198,05	21,98
<i>Euphobiaceae</i>	1.573,40	15,73	3.485,66	34,86	3.029,39	30,29	1.911,56	19,12
<i>Flacourtiaceae</i>	1.257,73	12,58	2.386,46	23,86	3.709,22	37,09	2.646,58	26,47
<i>Lauraceae</i>	1.166,34	11,66	3.154,88	31,55	3.495,15	34,95	2.183,63	21,84
<i>Myrtaceae</i>	781,07	7,81	3.906,07	39,06	3.772,15	37,72	1.540,71	15,41
<i>Sapindaceae</i>	1.131,89	11,32	4.217,87	42,18	2.377,32	23,77	2.272,92	22,73

Fonte: Autor.

As *Flacourtiaceae* (36,44%) e as *Lauraceae* (43,21%) tiveram a minoria de seus valores obtidos por krigagem abaixo da mediana da distribuição de frequências, ou seja, houve um incremento em área nos valores acima da mediana da distribuição. Em contraponto, as demais famílias mostraram equilíbrio entre valores acima e abaixo da mediana.

#### 4.3 Análise das mudanças na distribuição espacial das famílias botânicas

Os resultados da aplicação da álgebra de mapas para a análise das mudanças na distribuição espacial das famílias botânicas pode ser observado na Figura 27. Para a verificação das alterações espaciais existentes entre a primeira e a segunda data de análise utilizou-se como critério de fatiamento das imagens ( $IAE_{F_{Bi}}$ ) obtidas que os valores existentes entre a média menos um desvio padrão e a média mais um desvio padrão caracterizam não mudança na cobertura do solo (SANTOS et al., 2005). A Tabela 19 mostra os valores utilizados como ponto de corte do fatiamento realizado nas imagens, considerando a média como ponto central.

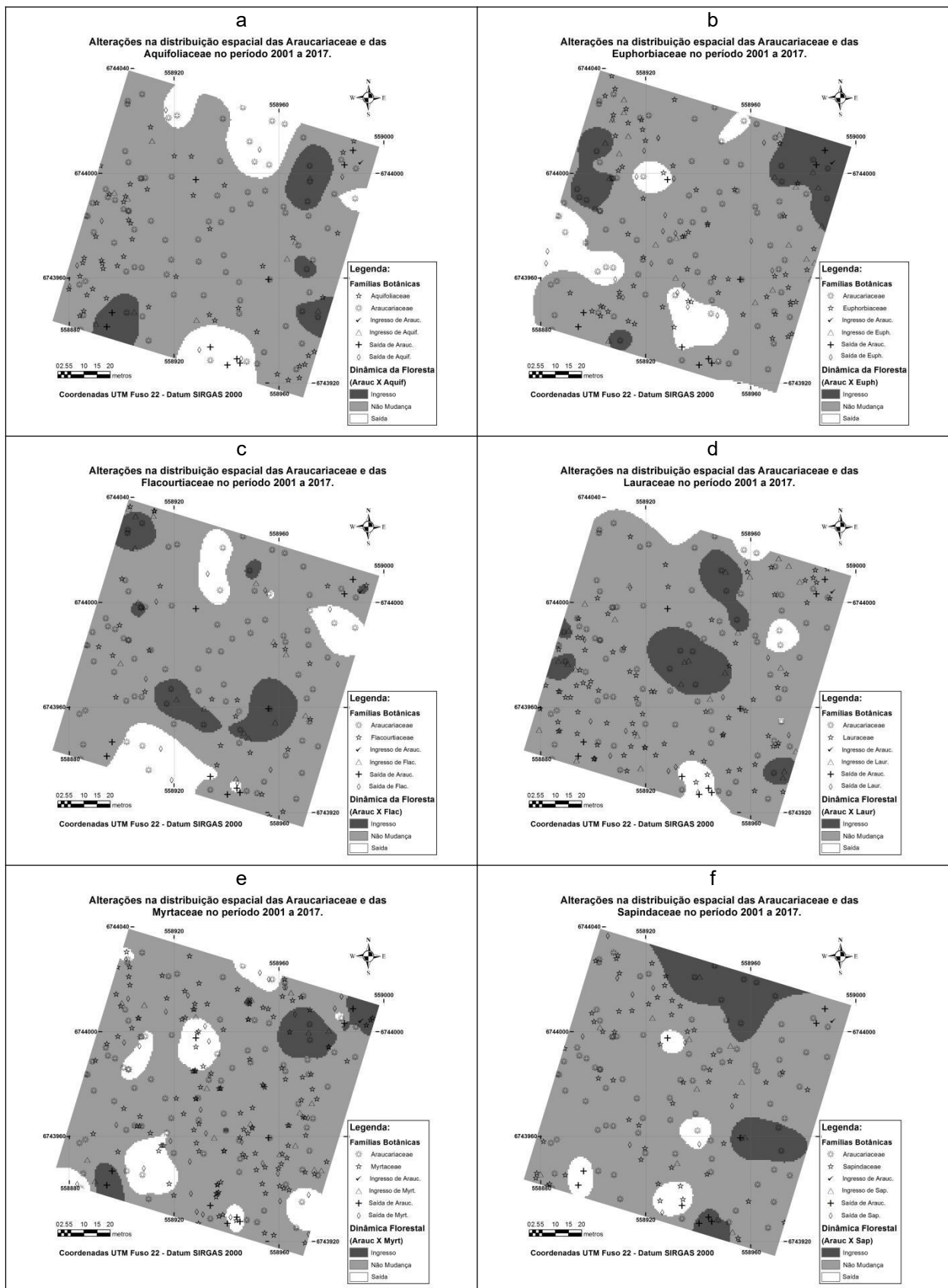
Tabela 19 – Classes de fatiamento para cada família botânica analisada.

Família Botânica	Ingresso de Árvores	Não Mudança	Saída de Árvores
<i>Aquifoliaceae</i>	-10,97 – -2,28	-2,28 – 4,14	4,14 – 14,27
<i>Euphobiaceae</i>	-9,46 – -2,20	-2,20 – 2,56	2,56 – 13,11
<i>Flacourtiaceae</i>	-7,12 – -2,32	-2,32 – 3,4	3,40 – 16,67
<i>Lauraceae</i>	-11,82 – -2,08	-2,08 – 1,16	1,16 – 5,66
<i>Myrtaceae</i>	-4,56 – -0,61	-0,61 – 1,27	1,27 – 7,83
<i>Sapindaceae</i>	-11,48 – -3,01	-3,01 – 1,33	1,33 – 5,61

Fonte: Autor.



Figura 27 - Interpolação espacial por krigagem ordinária pontual para a distância entre as famílias botânicas e as *Araucariaceae* na parcela 1539 em 2017.



Legenda: a) *Aquifoliaceae*; b) *Euphorbiaceae*; c) *Flacourtiaceae*; d) *Lauraceae*; e) *Myrtaceae*; f) *Sapindaceae*. Fonte: Autor.

Em virtude da utilização, na álgebra de mapas, da diminuição entre os valores obtidos no ano de 2001 e os valores obtidos em 2017, valores negativos significam que houve um ingresso de árvores naquele local já que diminui as distâncias entre as *Araucariaceae* e a família botânica em análise. Quando o resultado da subtração foi positivo significa que houve um aumento de distância entre as *Araucariaceae* e as árvores da outra família botânica em análise. Cabe observar que o ingresso ou saída de árvores se refere as duas famílias botânicas incluídas em cada análise.

A Tabela 20 mostra o quadro de áreas obtidas no processo de álgebra de mapas realizado.

Tabela 20 – Quadro de áreas para as imagens  $IAE_{F_{Bi}}$ .

Família Botânica	Ingresso de Árvores		Não Mudança		Saída de Árvores	
	m <sup>2</sup>	(%)	m <sup>2</sup>	(%)	m <sup>2</sup>	(%)
<i>Aquifoliaceae</i>	771,93	7,72	7.991,77	79,92	1.236,29	12,36
<i>Euphobiaceae</i>	1.066,86	10,67	7.746,41	77,46	1.186,73	11,87
<i>Flacourtiaceae</i>	904,46	9,04	7.915,49	79,15	1.180,05	11,80
<i>Lauraceae</i>	1.108,34	11,08	8.294,08	82,94	597,58	5,98
<i>Myrtaceae</i>	591,96	5,92	8.257,52	82,58	1.150,52	11,51
<i>Sapindaceae</i>	1.348,78	13,49	8.201,63	82,02	449,59	4,50

Fonte: Autor.

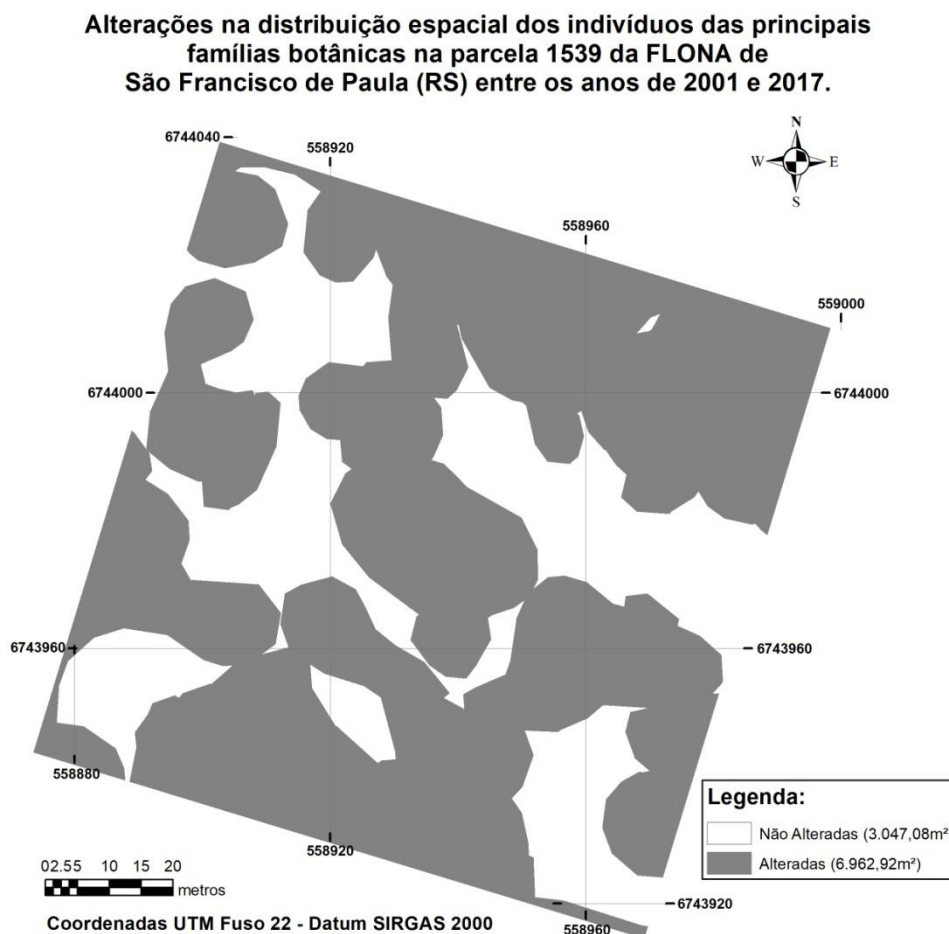
Observa-se que a Classe de Não Mudança na distribuição espacial das famílias botânicas prevaleceu na área de estudos com valores em torno a 80% que mantiveram o *status quo* original (entre 77,46% para as *Euphorbiaceae* e 82,94% para as *Lauraceae*). Ao observarmos os mapas gerados na análise podemos perceber que a parte central da parcela foi a que menos sofreu alterações, isso se deve a configuração espacial da floresta estudada que possui vias de acesso nas bordas da parcela (norte e oeste) e o plantio de espécie exóticas na porção leste da parcela, permite que as intervenções antrópicas nos arredores prejudiquem a configuração das bordas. Na parte sul da parcela a existência de banhados pode ter influenciado para uma maior saída e/ou ingresso de indivíduos na parcela.

O ingresso de árvores na parcela proporcionou alterações que variaram de 5,92% da área para o caso das *Myrtaceae* e 13,49% para as *Sapindaceae* e no caso da saída de árvores os números são parecidos com variação entre 5,98% (*Lauraceae*) e 12,36% (*Aquifoliaceae*).

A Figura 28 mostra quais os locais alterados e não alterados em sua distribuição espacial de indivíduos, onde podemos observar que a menor parte da área foi a que não sofreu alterações (3.047,08 m<sup>2</sup>), ou seja, em aproximadamente 70% da área existe algum tipo de alteração, seja por ingressos ou saídas de das árvores das famílias botânicas em estudo.

Se observarmos que em 2001 tínhamos uma área basal de 39,889m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> e em 2017 temos 41,383m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup> podemos pensar que a floresta está estagnada com um incremento de apenas 3,75% e área basal. No entanto quando considera-se a entrada e saída de árvores nos sistema observamos que a floresta está muito ativa, e isso nos leva a perguntar: a floresta está em equilíbrio dinâmico ou existem distúrbios que afetam o equilíbrio da mesma. Acreditamos que ambas suposições estejam certas para o fragmento florestal estudado e que as florestas adultas não ficam estagnadas.

Figura 28 – Localização das mudanças na distribuição espacial dos indivíduos entre os anos de 2001 e 2017 na parcela 1539 da FLONA.



Fonte: Autor.

## 5 CONCLUSÕES

Os Processos Pontuais e a Geoestatística permitiram analisar a distribuição espacial das famílias botânicas mais abundantes em parcela de FOM em São Francisco de Paula (RS). Já as relações entre as *Araucariaceae* e as demais famílias botânicas da parcela ora tiveram resultados concordantes e ora discordantes entre as duas técnicas utilizadas.

O padrão de distribuição espacial univariado para *Aquifoliaceae*, *Euphorbiaceae*, *Lauraceae*, *Myrtaceae* e *Sapindaceae* foi agregado e para *Araucariaceae* e *Flacourtiaceae* predominou o padrão completamente aleatório nas duas datas analisadas (2001 e 2017).

As *Araucariaceae* demonstraram ter padrão associado na distribuição espacial com as famílias botânicas *Aquifoliaceae*, *Lauraceae* e *Myrtaceae* (a partir de 20m aproximadamente), enquanto que o padrão de completa independência espacial foi observado com as famílias *Euphorbiaceae*, *Flacourtiaceae* e *Sapindaceae*.

A Geoestatística, por meio da variável de trabalho, refletiu o padrão de associação do processo pontual bivariado para a relação entre as *Araucariaceae* e as *Aquifoliaceae* e entre as *Araucariaceae* e as *Lauraceae*, nas duas datas estudadas. Não se observou o mesmo comportamento do processo pontual bivariado para a relação das *Araucariaceae* e as *Myrtaceae*.

As *Araucariaceae* e as *Flacourtiaceae* obtiveram ajuste variográfico satisfatório nos anos de estudo, discordando com o processo pontual marcado de completa independência espacial na maioria das distâncias de análise. As *Araucariaceae* e as *Euphorbiaceae* tiveram bom ajuste variográfico para o ano de 2001 e de baixa qualidade em 2017, enquanto que a relação entre *Araucariaceae* e *Sapindaceae*, dada pela variável de trabalho não permitiu encontrar estabilidade na semivariância nos anos de estudo.

A álgebra de mapas permitiu analisar as mudanças espaciais que ocorreram na floresta entre os anos de 2001 e 2017, onde pode ser observado que apenas 30,47% da parcela não sofreu nenhuma alteração na distribuição espacial dos indivíduos das famílias botânicas estudadas. A saída de árvores modificou em maior grau a relação entre as *Araucariaceae* e as famílias *Aquifoliaceae*, *Euphorbiaceae*,

*Flacourtiaceae* e *Myrtaceae*, enquanto que o ingresso de árvores produziu maiores mudanças na relação entre *Araucariaceae* e *Lauraceae* e entre *Araucariaceae* e *Sapindaceae*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, L. P. et al. Influência da floresta alterada na distribuição espacial de três espécies da Floresta Ombrófila Mista avaliada pela Geoestatística. **Revista Árvore**, Viçosa, v.37, n.3, p. 491-501, 2013.

AMARAL, L. P. Geoestatística Aplicada ao Manejo Florestal Experimental em Floresta Ombrófila Mista. 90 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura de Precisão). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

AMORIM, A. L. et al. Distribuição espacial de *Allophylus edulis* Radlk na parcela 1318 do Inventário Florestal Contínuo 2000 do RS. In: Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias. 3. 2013. Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP, 2013.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2003. 165p.

ANJOS, A. et al. Análise do padrão de distribuição espacial da araucária (*Araucaria angustifolia*) em algumas áreas no Estado do Paraná, utilizando a função K de Ripley. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 66, p. 38-45, 2004.

BADDELEY, A. et al. **Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R**. London: Chapman and Hall/CRC Press, 2015. Disponível em: <<http://www.crcpress.com/Spatial-Point-Patterns-Methodology-and-Applications-with-R/Baddeley-Rubak-Turner/9781482210200/>>. Acesso em 24 jul 2017.

BATISTA, J. Spatial dynamics of trees in a brazilian atlantic tropical forest under natural and managed conditions. 1994. 330 f. **Thesis** (University of Washington), Seattle, 1994.

BEGON, M. et al. **Ecology: from individuals to ecosystems**. 4 ed. Oxford: Blackwell, 2006. 738p.

BIONDI, F. et al. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 24, n. 7, p. 1354-1368, 1994.

CAMARGO, E. C. G. **Geoestatística: Fundamentos e aplicações**. INPE: São José dos Campos, 2001. Disponível: <[http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/5geoest.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf)>. Acesso em 24 jul 2017.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, n. 58, p. 1501-1511, 1994.

CANALEZ, G. G. et al. Dinâmica da estrutura da comunidade de lauráceas no período 1995-2004 em uma floresta de araucária no sul do estado do Paraná, Brasil. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 16, n. 4, p. 357-367. 2006.

CAPRETZ, R. L. et al. Padrão espacial de quatro formações florestais no estado de São Paulo, através da função K de Ripley. **Ciência Florestal**. v. 22, n. 3, p. 551-656. 2012.

CASS, A. **El papel del suelo en la viticultura de precisión**. Viticultura de precisión: Introducción y objetivos Viticultura de Precisión, VIII Encuentro Técnico, Madrid, 25 de abril de 2013.

CORREIA, P. **Modelação e Estimacão**: uma introdução à geoestatística. UFPR. 80p. 2010. Disponível em: <[http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/disciplinas:geoesalq:pira2012:numist\\_-\\_modelacao\\_e\\_estimacao\\_-sgems.pdf](http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/disciplinas:geoesalq:pira2012:numist_-_modelacao_e_estimacao_-sgems.pdf)>, Acesso em 10 ago 2017.

COSTA, G. G. O. **Curso de Estatística Inferencial e Probabilidades**: teoria e prática. São Paulo: Atlas, 2012. 370p.

CRESSIE, N. Fitting variogram models by weighted least squares. **Mathematical Geology**, 17:563-586, 1985.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York, John Wiley, 1993. 900p.

DALMASO, C. A. et al. Análise dos padrões espaciais de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer na floresta nacional de Irati (PR). **Ambiência**. v. 8, Edição Espacial, p. 559-570. 2012.

ESRI. **ArcGIS Desktop**: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. 2011.

FARACO, M. A. et al. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 32:464-476, 2008.

GENÚ, A. M. **Geoestatística Multivariada**. Piracicaba. 2004. Disponível em: <[WWW.lce.esalq.usp.br/tadeu/aline.pdf](http://WWW.lce.esalq.usp.br/tadeu/aline.pdf)>. Acesso em 08 ago 2015.

GOOGLE MAPS. Floresta Nacional de São Francisco de Paula (RS). 2017. Disponível em: <[HTTP://maps.google.com/](http://maps.google.com/)> Acesso em: 12 jul 2017.

HAASE, P. Spatial pattern analysis in ecology based on ripley's k function: introduction and methods of edge correction. **Journal of Vegetation Science**, Knivsta, v. 6, p. 575-582, 1995.

HACK, C. et al. Análise fitossociológica de um fragmento de floresta estacional decidual no município de Jaguari, RS. **Ciência Rural**, versão *online*, v. 35, n. 5. 2005.

HIGUCHI, P. et al. Associações espaciais entre indivíduos de diferentes espécies de *Miconia* Spp. Ruiz & Pav. (*Melastomataceae*). **Revista Árvore**. v. 35, n. 3, p. 381-389, 2011.

HIGUCHI, P. et al. Florística e estrutura do componente arbóreo e análise ambiental de um fragmento de floresta ombrófila mista alto-montana no município de Painel, SC. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 23, n. 1, p. 153-164. 2013.

HUSSAIN, M. et al. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 80, p. 91-106, jun. 2013.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro. 2 ed. 271 p. 2012.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press: 600 p. 1989.

KIEL, R. Detecção de mudanças no uso e na cobertura do solo em uma série temporal de imagens da região da campanha do Rio Grande do Sul. 203p. **Dissertação** (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

KRAINSKI, E. T.; RIBEIRO JR., P. J. **Análise de processos pontuais em dados de Citrus**. 2006. Disponível em < <http://www.leg.ufpr.br/Rcitrus/ppontuais/>>. Acesso em 01 ago 2017.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2ª. Edição, São Paulo: Editora Unesp, 2003. 253p.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, v.2, n.1, p.19-33, 2006.

LONGHI, S. J. et al. Classificação e Caracterização de Estágios Sucessionais em Remanescentes de Floresta Ombrófila Mista na FLONA de São Francisco de Paula, RS, Brasil. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 16, n. 2, p. 113-125, 2016.

MALDONADO, F. D. **Desenvolvimento e avaliação de uma metodologia de detecção de mudanças na cobertura vegetal no semi-árido**. 313p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.

MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das Gimnospermas**. Santa Maria: Editora da UFSM, 2005. 161 p.

McBRATNEY, A.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms the soil properties and fitting them to sample estimates. **Journal of Soil Science**, 37:617-639, 1986.

MELLO, J. M. et al. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, 69:25-37, 2005.

MIRA-SERRA. **Manual de capacitação para elaboração e implementação dos planos municipais de conservação e recuperação da Mata Atlântica**: RS, SC,



PR, MS. Coordenação geral do projeto Mira-Serra – Porto Alegre: Mira-Serra. 86 p. 2012.

MOEUR, M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data. **Forest Science**. v. 39, n. 4, p. 756-775, 1993.

MORAN, E. T. et al. Padrões de ocorrência espacial de espécies da floresta ombrófila mista no Paraná. **Scientia Agraria Paranaensis**. Marechal Cândido Rondon (PR), v. 15, n. 2, p. 132-139, 2016.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terra e Colonização, 1961. 42 p.

NARVAES, I. S. et al. Estrutura da regeneração natural em floresta ombrófila mista na floresta nacional de São Francisco de Paula, RS. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 331-342. 2005.

NASCIMENTO, A. R. T. et al. Estrutura e padrões de distribuição espacial de espécies arbóreas em uma amostra de Floresta Ombrófila Mista em Nova Prata, RS. **Ciência Florestal**, v. 11, n. 1, p. 105-119, 2001.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2015. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em 24 jul 2017.

RIBEIRO JR., P. J.; DIGGLE, P. J. geoR: A package for geostatistical analysis. **R-NEWS**, Vol 1, N. 2. 2001. ISSN 1609-3631. Disponível em <<http://cran.r-project.org/doc/Rnews>>. Acesso em 24 jul 2017.

RIO GRANDE DO SUL. Governo do Estado. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. **Inventário Florestal Contínuo do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: FATEC/SEMA, 2002. 706p.

RIPLEY, B. D. Modelling spatial patterns (with discussion). **Journal of the Royal Statistical Society**, series B, v. 39, n. 2, p. 172–212, 1977.

RIPLEY, B. D. **Spatial Statistics**. New York: John Wiley and Sons, 1981. 252p.

ROBB, D. M.; RUSSELL, G. A Quantitative Comparison of Change-Detection Algorithms for Monitoring Eelgrass from Remotely Sensed Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 64, n. 3, p. 207-216, 1998.

SANTOS, J. R. et al. Integração de imagens Landsat/ETM+ e CBERS-2/CCD para detecção de mudanças em áreas da Amazônia sob domínio da floresta de transição. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 57, n. 1, p. 15-21, 2005.

SCHABENBERGER, O.; GOTWAY, C. A. **Statistical methods for spatial data analysis**. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2005. 488 p.

SEBEM, E. **Desenvolvimento e aplicabilidade de uma base de dados relacional para o inventário florestal contínuo do Rio Grande do Sul**. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola: Sensoriamento Remoto). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

SEBEM, E. Distribuição espacial de *Araucaria angustifoli* (Bertol.) Kuntze em parcela de floresta ombrófila mista. In: Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística – SINAPE, 22º, 2016. Porto Alegre/RS. **Anais...** Porto Alegre/RS: Associação Brasileira de Estatística, 2016. Disponível em: <[www.redeabe.org.br/novosinape2016/](http://www.redeabe.org.br/novosinape2016/)>. Acesso em 24 jul 2017.

SEIDEL, E J; OLIVEIRA, M S. A classification for a geostatistical index of spatial dependence. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1-10 (e0160007), 2016.

SEIDEL, E J; OLIVEIRA, M S. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 699-705, 2014.

SEVERIANO, C. E. Potencial do manejo de *Parapiptadenia rígida* (Benth.) Brenan em sistema de alto fuste jardinado. 90 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

SIGNOR, P. et al. Produção de erva-mate e conservação da Floresta com Araucária. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo (PR), v. 35, n. 83, p. 199-208. 2015.

SILVA, M. A. et al. Análise da distribuição espacial da candeia (*Eremanthus Erythropappus* (DC.) MacLeish) sujeita ao sistema de manejo porta - semente. **Cerne**. Lavras, v. 14, n. 4, p. 311-316, 2008.

SILVESTE, R. et al. Análise estrutura e distribuição espacial em remanescente de Floresta Ombrófila Mista, Guarapuava, PR. **Ambiência Guarapuava**. v. 8. n. 2 p. 259-274. 2012.

SOARES, A. **Geoestatística para ciências da terra e do ambiente**. 2 ed., Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2006, 214p.

SOMMER, G. V. (coord.). *Sapindaceae* In: MARTINS, S. E., WANDERLEY, M.G.L., SHEPHERD, G.J., GIULIETTI, A.M., MELHEM, T.S. (editores). **Flora Fanerogâmica do Estado de São Paulo**. Instituto de Botânica. São Paulo. vol. 6, p. 195-256. 2009.

SOUZA, V. C.; LORENZI, H. **Botânica Sistemática: guia ilustrado para identificação de famílias da Fanerógamas nativas e exóticas no Brasil, baseado em APG II**. 2 ed. Nova Odessa (SP): Insituto Plantarum, 2008. 704p.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS, UFRGS, 2002. 107p

THADEO, M. **Anatomia foliar de espécies de Flacourtiaceae (SLEUMER 1980)**. 108p. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal). Universidade Federal de Viçosa. 2007.

VELOSO, H. P. et al. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1998.

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

## Apêndice A – Algoritmos em R para o Processo Pontual Marcado

```
library(spatstat)
dados <- read.table("familias_2001.txt", h=T)
dados
names(dados)
summary(dados)
#
plot(dados$ER, dados$NR)
#
W <- owin(poly = list(x = c(-5, 100, 130, 20), y = c(20, -5, 100, 130)))
plot(W)
X <- ppp(dados$ER,dados$NR, window=W, marks=dados$FAMILIA)
X
#
summary(X)
plot(X)
#
# Separando os dois tipos de resposta da marca para o Mapa:
Distribuição_Espacial_Familias <- split(X)
Distribuição_Espacial_Familias
plot(Distribuição_Espacial_Familias)
#
# Separando os tipos de resposta da marca:
s <- split(X)
s
plot(s)
#
# considerando uma marca por vez:
Araucariaceae <- envelope(s$Araucariaceae, Kest)
plot(Araucariaceae)
#
Myrtaceae <- envelope(s$Myrtaceae, Kest)
plot(Myrtaceae)
#
Lauraceae <- envelope(s$Lauraceae, Kest)
plot(Lauraceae)
#
Euphorbiaceae <- envelope(s$Euphorbiaceae, Kest)
plot(Euphorbiaceae)
#
Sapindaceae <- envelope(s$Sapindaceae, Kest)
plot(Sapindaceae)
#
Aquifoliaceae <- envelope(s$Aquifoliaceae, Kest)
plot(Aquifoliaceae)
#
Flacourtiaceae <- envelope(s$Flacourtiaceae, Kest)
plot(Flacourtiaceae)
#
# considerando a marca (duas a duas):
Araucariaceae_X_Myrtaceae <- envelope(X, Kcross, i="Arauc", j="Myrt")
plot(Araucariaceae_X_Myrtaceae)
#
Araucariaceae_X_Lauraceae <- envelope(X, Kcross, i="Arauc", j="Laur")
plot(Araucariaceae_X_Lauraceae)
#
Araucariaceae_X_Euphorbiaceae <- envelope(X, Kcross, i="Arauc", j="Euph")
plot(Araucariaceae_X_Euphorbiaceae)
```

```
#
Araucariaceae_X_Sapindaceae <- envelope(X, Kcross, i="Arauc", j="Sap")
plot(Araucariaceae_X_Sapindaceae)
#
Araucariaceae_X_Aquifoliaceae <- envelope(X, Kcross, i="Arauc", j="Aquif")
plot(Araucariaceae_X_Aquifoliaceae)
#
Araucariaceae_X_Flacourtiaceae <- envelope(X, Kcross, i="Arauc", j="Flac")
plot(Araucariaceae_X_Flacourtiaceae)
##
envK <- alltypes(X, Kcross, envelope = TRUE)
plot(envK)
```

## Apêndice B – Algoritmos em R para a Análise Variográfica e Interpolação Espacial

```
library(geoR)
geodados <- read.geodata(file.choose(),h=T)
geodados
summary(geodados)
sd(geodados$data)
var(geodados$data)
(CV <- (sd(geodados$data)/mean(geodados$data))*100)
plot(geodados$coords)
#
# Análise exploratória - Análise gráfica
plot(geodados, lowes=TRUE)
#
# boxplot
boxplot(geodados$data, xlab="Dados")
#
# Análise variográfica (variografia)
#
# Estimando o semivariograma (Semivariograma amostral)
# Definindo um h máximo de interesse
#
hmax100 <- summary(geodados)[[3]][[2]]*1
hmax100 # 100%
hmax90 <- summary(geodados)[[3]][[2]]*0.9
hmax90 # 90%
hmax80 <- summary(geodados)[[3]][[2]]*0.8
hmax80 # 80%
hmax70 <- summary(geodados)[[3]][[2]]*0.7
hmax70 # 70%
hmax60 <- summary(geodados)[[3]][[2]]*0.6
hmax60 # 60%
hmax50 <- summary(geodados)[[3]][[2]]*0.5
hmax50 # 50%
#
#Variograma clássico:
vario100 <- variog(geodados, estimator="classical", max.dist=hmax100)
vario90 <- variog(geodados, estimator="classical", max.dist=hmax90)
vario80 <- variog(geodados, estimator="classical", max.dist=hmax80)
vario70 <- variog(geodados, estimator="classical", max.dist=hmax70)
vario60 <- variog(geodados, estimator="classical", max.dist=hmax60)
vario50 <- variog(geodados, estimator="classical", max.dist=hmax50)
#
par(mfrow = c(1, 6))
plot(vario100, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 100%")
plot(vario90, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 90%")
plot(vario80, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 80%")
plot(vario70, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 70%")
plot(vario60, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 60%")
plot(vario50, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 50%")
#
vario100$n
vario90$n
vario80$n
vario70$n
vario60$n
vario50$n
#
# Escolha ...
```

```

#
# Avaliação a partir da escolha do hmax "mais adequado"
# Envelopes para verificar a existência de dependência espacial
#
vario100.env <- variog.mc.env(geodados, obj.var=vario100)
vario90.env <- variog.mc.env(geodados, obj.var=vario90)
vario80.env <- variog.mc.env(geodados, obj.var=vario80)
vario70.env <- variog.mc.env(geodados, obj.var=vario70)
vario60.env <- variog.mc.env(geodados, obj.var=vario60)
vario50.env <- variog.mc.env(geodados, obj.var=vario50)
#
plot(vario100, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 100%", envelope=vario100.env)
plot(vario90, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 90%", envelope=vario90.env)
plot(vario80, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 80%", envelope=vario80.env)
plot(vario70, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 70%", envelope=vario70.env)
plot(vario60, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 60%", envelope=vario60.env)
plot(vario50, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 50%", envelope=vario50.env)
#
#####
#
# Ajuste dos modelos teóricos
# Escolha visual do modelo
#
# OLS => equal
# Modelo esférico
var.sph <- variofit(vario90, cov.model="sph", weights="npairs")
var.sph
#
# Modelo exponencial
var.exp <- variofit(vario90, cov.model="exp", weights="npairs")
var.exp
#
# Modelo Gaussiano
var.gaus <- variofit(vario90, cov.model="gaus", weights="npairs")
var.gaus
#
par(mfrow = c(1, 1))
plot(vario90, xlab="Distância (h)", ylab="Semivariância", sub="hmax 90%")
lines(var.sph,lwd=1,lty=1,col="red")
lines(var.exp,lwd=1,lty=1,col="blue")
lines(var.gaus,lwd=1,lty=1,col="black")
#
var.sph[[5]]
var.exp[[5]]
var.gaus[[5]]
#
#####
#
##### Validação cruzada #####
#
##### Modelo Esférico #####
#
vc.vario.sph1 <- xvalid(geodados, model=var.sph)
vc.vario.sph1$data
vc.vario.sph1$predicted
vc.vario.sph1$error
mean(vc.vario.sph1$error) #media do erro
sqrt(mean(abs(vc.vario.sph1$error))) # desvio padrão dos erros
mean(vc.vario.sph1$std.error) #erro medio reduzido
sqrt(mean(abs(vc.vario.sph1$std.error))) #Desvio Padrao dos erros reduzidos

```

```

sum(abs(vc.vario.sph1$data-vc.vario.sph1$predicted)) # Erro absoluto
regvc.sph1 <- lm(vc.vario.sph1$data ~ vc.vario.sph1$predicted)
summary(regvc.sph1)
summary(regvc.sph1)[[9]][[1]] # R^2 da validação cruzada
#
##### Modelo Exponencial #####
#
vc.vario.exp1 <- xvalid(geodados, model=var.exp)
vc.vario.exp1$data
vc.vario.exp1$predicted
vc.vario.exp1$error
mean(vc.vario.exp1$error) #media do erro
sqrt(mean(abs(vc.vario.exp1$error))) # desvio padrão dos erros
mean(vc.vario.exp1$std.error) #erro medio reduzido
sqrt(mean(abs(vc.vario.exp1$std.error))) #Desvio Padrao dos erros reduzidos
sum(abs(vc.vario.exp1$data-vc.vario.exp1$predicted)) # Erro absoluto
regvc.exp1 <- lm(vc.vario.exp1$data ~ vc.vario.exp1$predicted)
summary(regvc.exp1)
summary(regvc.exp1)[[9]][[1]] # R^2 da validação cruzada#
#
##### Modelo Gaussiano #####
#
vc.vario.gaus1 <- xvalid(geodados, model=var.gaus)
vc.vario.gaus1$data
vc.vario.gaus1$predicted
vc.vario.gaus1$error
mean(vc.vario.gaus1$error) #media do erro
sqrt(mean(abs(vc.vario.gaus1$error))) # desvio padrão dos erros
mean(vc.vario.gaus1$std.error) #erro medio reduzido
sqrt(mean(abs(vc.vario.gaus1$std.error))) #Desvio Padrao dos erros reduzidos
sum(abs(vc.vario.gaus1$data-vc.vario.gaus1$predicted)) # Erro absoluto
regvc.gaus1 <- lm(vc.vario.gaus1$data ~ vc.vario.gaus1$predicted)
summary(regvc.gaus1)
summary(regvc.gaus1)[[9]][[1]] # R^2 da validação cruzada#
#
#####
#
##### Krigagem #####
#
# Krigagem ordinária - modelo esférico
#
grid = expand.grid(seq(summary(geodados)[[2]][[1]],summary(geodados)[[2]][[2]],l=150),
                  seq(summary(geodados)[[2]][[3]],summary(geodados)[[2]][[4]],l=150))
kg = krige.conv(geodados, location=grid, krige=krige.control(cov.pars=var.sph$cov.pars))
nome_arquivo <- kg$predict
write.table(nome_arquivo, file='nome_arquivo.csv', sep=',', dec='.', row.name=FALSE)
image(kg, location=grid) # mapa dos valores estimados
legend.krige(x.leg=c(558860,558890), y.leg=c(6743930,6744000), kg$pred, vert=T, off=0.6, cex=0.9)
#
# Krigagem ordinária - modelo exponencial
#
grid = expand.grid(seq(summary(geodados)[[2]][[1]],summary(geodados)[[2]][[2]],l=150),
                  seq(summary(geodados)[[2]][[3]],summary(geodados)[[2]][[4]],l=150))
kg = krige.conv(geodados, location=grid, krige=krige.control(cov.pars=var.exp$cov.pars))
nome_arquivo <- kg$predict
write.table(nome_arquivo, file='nome_arquivo.csv', sep=',', dec='.', row.name=FALSE)
image(kg, location=grid) # mapa dos valores estimados
legend.krige(x.leg=c(558860,558890), y.leg=c(6743930,6744000), kg$pred, vert=T, off=0.6, cex=0.9)
#
# Krigagem ordinária - modelo gaussiano

```



```
#
grid = expand.grid(seq(summary(geodados)[[2]][[1]],summary(geodados)[[2]][[2]],l=150),
                  seq(summary(geodados)[[2]][[3]],summary(geodados)[[2]][[4]],l=150))
kg = krige.conv(geodados, location=grid, krige=krige.control(cov.pars=var.gaus$cov.pars))
nome_arquivo <-- kg$predict
write.table(nome_arquivo, file='nome_arquivo.csv', sep=',', dec='.', row.name=FALSE)
image(kg, location=grid) # mapa dos valores estimados
legend.krige(x.leg=c(558860,558890), y.leg=c(6743930,6744000), kg$pred, vert=T, off=0.6, cex=0.9)
#
#####
#
```

## Apêndice C – Algoritmos em R para Cálculo do Índice de Dependência Espacial

```
# Função:
C0 <- # efeito pepita
C1 <- # contribuição
a <- # alcance prático
MD <- # máxima distância
#
I <- if (C1==0) {
I = 0
} else {
I = C1 / (C0 + C1)
}
II <- if (a>=(0.5*MD)) {
II = 1
} else {
II = a / (0.5*MD)
}
#
# IDE no modelo Esférico
IDE_esf <- 0.375*I*II*100
IDE_esf
# Classificação do IDE_esf
if (IDE_esf < 7) {
cat("Fraca dependência espacial")
} else if (IDE_esf >= 7 && IDE_esf < 15) {
cat("Moderada dependência espacial")
} else {
cat("Forte dependência espacial")
}
#
# IDE no modelo Exponencial
IDE_exp <- 0.317*I*II*100
IDE_exp
# Classificação do IDE_exp
if (IDE_exp < 6) {
cat("Fraca dependência espacial")
} else if (IDE_exp >= 6 && IDE_exp < 13) {
cat("Moderada dependência espacial")
} else {
cat("Forte dependência espacial")
}
#
# IDE no modelo Gaussiano
IDE_gaus <- 0.504*I*II*100
IDE_gaus
# Classificação do IDE_gaus
if (IDE_gaus < 9) {
cat("Fraca dependência espacial")
} else if (IDE_gaus >= 9 && IDE_gaus < 20) {
cat("Moderada dependência espacial")
} else {
cat("Forte dependência espacial")
}
#
```