



Arthur Rodrigo Favre Silvestre e Estevão

**Geometria fractal em pinturas: uma possível
ferramenta para identificação de padrões associados
à esquizofrenia**

Recife

Julho de 2026

Arthur Rodrigo Favre Silvestre e Estevão

**Geometria fractal em pinturas: uma possível
ferramenta para identificação de padrões associados
à esquizofrenia**

Artigo apresentado ao Curso de Bacharelado
em Sistemas de Informação da Universidade
Federal Rural de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Sistemas de Informação.

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Departamento de Estatística e Informática

Curso de Bacharelado em Sistemas de Informação

Orientador: Silvana Bocanegra e Jones Albuquerque

Recife

Julho de 2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

- E79g Estevão, Arthur Rodrigo Favre Silvestre e.
 Geometria fractal em pinturas: uma possível
 ferramenta para identificação de padrões associados
 à esquizofrenia / Arthur Rodrigo Favre Silvestre e
 Estevão. – Recife, 2026.
 39 f.; il.
- Orientador(a): Silvana Bocanegra.
 Co-orientador(a): Jones Albuquerque.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –
 Universidade Federal Rural de Pernambuco,
 Bacharelado em Sistemas da Informação, Recife, BR-
 PE, 2026.
- Inclui referências.
1. Geometria. 2. Fractais. 3. Esquizofrênia. 4.
 Padrões 5. Sistemas de informação - Estudo e ensino.
 I. Bocanegra, Silvana, orient. II. Albuquerque, Jones,
 coorient. III. Título

Geometria fractal em pinturas: uma possível ferramenta para identificação de padrões associados à esquizofrenia

[Arthur Rodrigo Favre Silvestre e Estevão]¹, [Silvana Bocanegra]²,
[Jones Albuquerque]³

¹Departamento de Estatística e Informática – Universidade Federal Rural de Pernambuco
Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, - CEP: 52171-900 – Recife – PE – Brasil

[arthur.rodriago@ufrpe.br]

Resumo. A geometria fractal tem sido amplamente adotada para quantificar formas e texturas irregulares em imagens digitais. Neste trabalho a abordagem é utilizada para analisar obras de artistas com histórico de esquizofrenia, buscando investigar alterações visuais relacionadas ao transtorno. Utilizando o método box-counting, desenvolveu-se um modelo computacional para estimar a dimensão fractal de pinturas. Em uma análise global, foram avaliadas 1.270 pinturas de artistas sem transtornos relatados e 68 pinturas de artistas com esquizofrenia; não foram encontradas diferenças substanciais na dimensão fractal entre os grupos. Foram selecionados quatro artistas para um análise temporal; a dimensão fractal das obras dos artistas enfermos aumentou progressivamente coincidindo com o agravamento da doença e surtos documentados. O grupo controle apresentou oscilações mais estáveis, com leve tendência de crescimento. Embora sejam necessários mais testes, esta avaliação inicial sugere que a dimensão fractal tem potencial como métrica quantitativa para identificar padrões visuais associados à progressão da esquizofrenia. Os algoritmos desenvolvidos oferecem uma base computacional para sistemas de apoio ao diagnóstico e controle da doença.

Abstract. Fractal geometry has been widely adopted to quantify irregular shapes and textures in digital images. In this study, this approach is used to analyze artworks by artists with a history of schizophrenia, aiming to investigate visual changes associated with the disorder. Using the box-counting method, a computational model was developed to estimate the fractal dimension of paintings. A global analysis evaluated 1,270 paintings by artists with no reported disorders and 68 paintings by artists with schizophrenia; no substantial differences in fractal dimension were found between the groups. Four artists were selected for a longitudinal analysis; the fractal dimension of the works by the artists with the disorder increased progressively, coinciding with the worsening of the condition and documented episodes. The control group showed more favorable fluctuations, with a slight upward trend. Although further testing is required, this initial assessment suggests that fractal dimension has potential as a quantitative metric for identifying visual patterns associated with the progression of schizophrenia. The developed algorithms provide a computational foundation for systems supporting diagnosis and disease monitoring.

1. Introdução

Entre os séculos XIX e XX, o psiquiatra alemão Emil Kraepelin analisou e classificou transtornos mentais que causavam alucinações, enfraquecimento afetivo e dificuldade de atenção e compreensão. Kraepelin nomeou tal classificação como *demência precoce* e a subdividiu em três tipos - hebefrênica, catatônica e paranóide. Além disso, outro psiquiatra suíço - Eugen Bleuler - notou, nos pacientes afetados, uma desconexão em funções cognitivas como pensamento, emoção e comportamento. Tendo em vista a separação destas entidades na mente, Bleuler originou o termo esquizofrenia, palavra composta por duas derivações gregas - *schizo* significa divisão, e *frenia*, mente - deixando para trás o termo *demência precoce* [Regina 2006].

Devido às disfunções mentais causadas pelo transtorno, os portadores da doença também podem apresentar violência, agressividade ou automutilação em surtos psicóticos decorrentes de alucinações ou delírios [Hoptman 2015]. Além das alterações perceptivas e cognitivas características da esquizofrenia, a doença também pode estar associada a modificações no comportamento motor e na execução de ações voluntárias. Sintomas como catatonia, estereotípias, maneirismos e déficits cognitivos podem comprometer a organização e o planejamento dos movimentos, afetando a forma como os indivíduos interagem com o ambiente e executam tarefas que demandam coordenação motora [Pull 1999]. Considerando que a produção artística envolve processos cognitivos, perceptivos e motores integrados, tais alterações podem influenciar aspectos relacionados à precisão dos traços, ao controle dos movimentos e à organização espacial de pinturas.

Apesar da incógnita acerca da influência de transtornos mentais em habilidades artísticas, o impacto da arte no tratamento de doenças mentais já aparenta ser objeto de estudo com comprovações práticas. A união entre a arte e a psicologia tem espaço consolidado no âmbito medicinal. A produção artística, em alguns casos, incluindo a pintura, é utilizada como método auxiliar no processo de tratamento de transtornos mentais realizado por profissionais da arteterapia. Tal prática terapêutica oferece um potencial de melhoria através do estímulo à expansão da consciência e autoconhecimento [Ciornai 2004]. Um exemplo de adoção da arteterapia como prática de tratamento de portadores de condições psíquicas é publicado pelo Museu de Imagens do Inconsciente¹. Tendo em vista a proximidade da esquizofrenia com a arte, indagações acerca da real influência do transtorno nas habilidades artísticas de pacientes causaram diversos e profundos estudos.

Um grande marco na investigação desta hipotética correlação é a obra do psiquiatra alemão Hans Prinzhorn, na qual observou-se que pacientes esquizofrênicos possuíam uma tendência a utilizar elementos repetitivos e preencher espaços vazios em suas pinturas [Hans 1922]. Outro caso interessante envolve o famoso ilustrador britânico Louis Wain. O artista apresentou uma mudança drástica nos padrões estruturais de seus desenhos ao decorrer da vida, principalmente durante sua internação numa instituição psiquiátrica após apresentar surtos psicóticos com agressividade contra suas irmãs. Com o passar do tempo, os gatos de Louis saíram de representações realistas para complexas estruturas geométricas como evidenciado na Figura 1 [McGennis 1999].

¹Centro de estudo e pesquisa focado na expressão artística de portadores de transtornos psíquicos



(a) *The Barrister*



(b) Título desconhecido



(c) Título desconhecido



(d) Título desconhecido

Figura 1. Exemplo de aumento progressivo de complexidade das artes de *Louis Wain*. Fonte: WikiArt.

Embora diversos estudos tenham constatado alterações visuais em pinturas de portadores de esquizofrenia, tais observações foram realizadas de maneira qualitativa. Dessa forma, surge a necessidade de métodos quantitativos capazes de descrever objetivamente características presentes nas obras e identificar possíveis padrões associados ao transtorno. Nesse contexto, a geometria fractal apresenta-se como uma ferramenta promissora para a análise de estruturas complexas. Formulada por Benoit Mandelbrot, a teoria dos fractais foi desenvolvida para descrever formas irregulares encontradas tanto na natureza quanto em sistemas artificiais, as quais não podem ser adequadamente caracterizadas pela geometria euclidiana tradicional. Uma das principais métricas dessa teoria é a dimensão fractal, medida que quantifica o grau de complexidade geométrica de um objeto por meio da análise de seus padrões em diferentes escalas de observação [Mandelbrot 1982].

A aplicação da geometria fractal em imagens tem sido amplamente explorada em diferentes áreas do conhecimento, incluindo medicina e história da arte. Estudos anteriores demonstraram que métricas quantitativas extraídas de imagens podem revelar informações relevantes sobre a evolução dos estilos artísticos adotados pela arte humana ao passar dos séculos [Sigaki et al. 2018]. Além disso, o novo ramo da geometria tem espaço consolidado na área da saúde. Por exemplo, a teoria fractal fundamenta sistemas de diagnóstico por imagem, no âmbito da oncologia, para aprimorar tanto o acompanhamento quanto o tratamento de tumores através da aplicação de conceitos como a dimensão fractal no estudo da autossimilaridade e irregularidade presentes nos órgãos [Perusso 2022]. Dessa forma, a dimensão fractal surge como uma possível ferramenta para investigar se as modificações estruturais observadas em pinturas produzidas por indivíduos com esquizofrenia estão associadas a padrões mensuráveis de complexidade visual.

Com base nessa perspectiva, este trabalho tem como objetivo principal investigar a relação entre o transtorno de esquizofrenia com a variação da dimensão fractal de pinturas produzidas por artistas portadores da condição comparados a um grupo de controle (sem evidências da doença). Como objetivos específicos:

- Analisar se há alteração na dimensão fractal das obras de um artista com a progressão da doença.
- Analisar o impacto de surtos psicóticos violentos na dimensão fractal das pinturas.
- Desenvolver um protótipo de ferramenta baseado em geometria fractal para auxiliar no diagnóstico e controle da doença.

2. Trabalhos Relacionados

Em [Sigaki et al. 2018], os autores demonstram que métodos computacionais de análise quantitativa podem extrair informações relevantes sobre a estrutura visual das obras de arte, permitindo identificar padrões associados a estilos artísticos, períodos históricos e características da produção de diferentes artistas. Para isso, eles investigaram a evolução histórica da arte com base em métricas de complexidade e entropia extraídas diretamente dos pixels de 137.364 pinturas produzidas por mais de 2.000 artistas. Os padrões identificados capturaram características relevantes que possibilitaram a classificação automática de estilos artísticos através de algoritmos de aprendizado de máquina. Os resultados destacam o potencial de métodos quantitativos de análise de imagens, como a dimensão fractal,

e reforçam seu uso neste trabalho, para a investigação objetiva de possíveis relações entre características visuais de obras e traços de esquizofrenia.

A relação entre doenças neurológicas e habilidades artísticas é objeto de estudo consolidado no âmbito acadêmico. Forsythe, Williams e Reilly [Forsythe et al. 2017] investigaram se variações na dimensão fractal de pinturas poderiam refletir alterações cognitivas associadas ao envelhecimento e a doenças neurodegenerativas. Os autores analisaram 2.092 imagens digitais produzidas por sete artistas ao longo da vida e calcularam a dimensão fractal das obras em diferentes idades. Dentre os sete artistas estudados, 3 tiveram envelhecimento sem problemas neurais enquanto os outros 4 foram diagnosticados com Alzheimer e Parkinson. Os resultados indicaram que os padrões de variação da dimensão fractal diferenciaram artistas portadores de deterioração neurológica daqueles pertencentes ao grupo de envelhecimento normal. Enquanto a variação da dimensão fractal das pinturas dos artistas saudáveis apresentaram uma tendência linear positiva ao passar dos anos, a variação dos artistas diagnosticados com Alzheimer e Parkinson apresentaram uma tendência linear negativa e curvilínea, respectivamente.

No contexto do estudo relacionado à esquizofrenia, Henemann, Brachmann e Redies [Henemann et al. 2017] investigaram se propriedades estatísticas de imagens poderiam identificar características visuais associadas à esquizofrenia em obras artísticas. Os autores analisaram 1.256 obras pertencentes à Coleção Prinzhorn, produzidas por 14 artistas diagnosticados com esquizofrenia ou demência precoce. Foram calculadas 6 propriedades relacionadas à composição visual, incluindo dimensão fractal e autossimilaridade. Os resultados foram comparados com obras provenientes de três coleções públicas de arte utilizadas como grupo controle. Embora grande parte das obras dos artistas com esquizofrenia tenha apresentado características semelhantes às do grupo controle, os autores observaram que 6 dos 14 artistas analisados possuíam propriedades visuais significativamente distintas. Dentre os 6 artistas divergentes, 2 deles apresentaram diferenças notáveis na dimensão fractal e grau de autossimilaridade nas obras. Neste trabalho, realiza-se também uma análise temporal de cada artista para identificar oscilações na dimensão fractal ao longo da doença ao invés de analisar o conjunto de obras dos artistas de maneira atemporal.

3. Fundamentação Teórica

3.1. Geometria Fractal

Diversos elementos presentes na natureza apresentam formas e padrões que não podem ser adequadamente descritos pela geometria euclidiana tradicional. Elementos como brócolis, flocos de neve, ramificações de árvores e até contornos de costas marítimas exibem elevados níveis de irregularidade e complexidade geométrica em suas estruturas (Figura 2) [Mandelbrot 1982]. Questionamentos acerca da representação matemática dessas formas, como a indagação de Mandelbrot sobre o formato de uma nuvem, impulsionaram o desenvolvimento da geometria fractal.



(a) Brócolis romanesco.

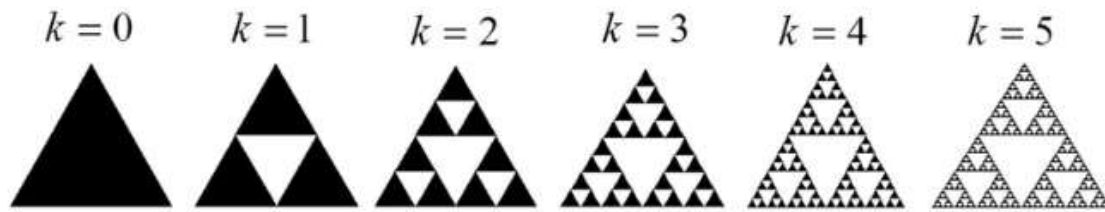


(b) Ramificações de uma árvore.

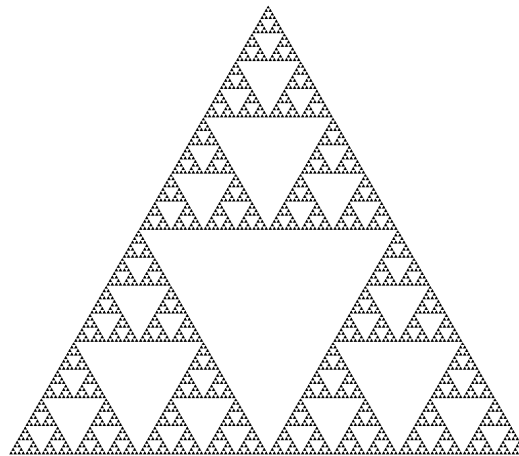
Figura 2. Exemplos de estruturas fractais encontradas na natureza. Fonte: <https://www.treehugger.com/amazing-fractals-found-in-nature-4868776>

Segundo Mandelbrot, os fractais são objetos geométricos caracterizados por elevada irregularidade e pela presença de padrões que se repetem em diferentes escalas de observação [Mandelbrot 1982]. Muitos desses objetos apresentam autossimilaridade, propriedade segundo a qual partes da estrutura reproduzem a forma do todo quando observadas em diferentes níveis de ampliação. Em fractais autossimilares, como o Triângulo de Sierpinski, cada porção da figura mantém características geométricas semelhantes às da estrutura completa, independentemente da escala em que é analisada.

Proposto pelo matemático polonês Wacław Sierpiński em 1915, o Triângulo de Sierpinski (Figura 3) constrói-se a partir de um triângulo equilátero, que é subdividido em quatro triângulos congruentes, removendo-se o triângulo central. O mesmo procedimento é então repetido recursivamente nos triângulos restantes, produzindo uma estrutura caracterizada pela autossimilaridade, na qual cada parte reproduz a forma do todo em escalas menores. Como evidenciado na Figura 3, o processo de construção inicia-se na etapa $k = 0$ com um único triângulo cheio. Na primeira etapa ($k = 1$), derivam-se 3 novos triângulos similares com $\frac{1}{2}$ do tamanho do lado do triângulo anterior e assim sucessivamente. À medida que o processo iterativo avança, surgem padrões geométricos cada vez mais complexos [Peitgen et al. 2004].



(a)



(b)

Figura 3. (a) Etapas de construção do Triângulo de Sierpinski. (b) Triângulo de Sierpinski após sucessivas iterações. Fontes: Wikipedia.

Nem todos os fractais apresentam autossimilaridade exata. Em muitos casos, especialmente em estruturas naturais, observa-se apenas uma autossimilaridade estatística, na qual diferentes partes do objeto não são cópias perfeitas da estrutura global, mas preservam propriedades geométricas semelhantes [Mandelbrot 1982]. Um exemplo clássico são as costas marítimas, como a costa britânica. Supõe-se que deseja-se medir o comprimento da costa e o instrumento de medição, representado pelas retas na cor laranja na Figura 4, possua três tamanhos N distintos em quilômetros (200, 100 e 50). Cada vez que o tamanho do instrumento é reduzido, o comprimento da costa tende a aumentar. Nesse caso, o comprimento da costa pode variar conforme a escala de medição utilizada, já que instrumentos mais detalhados capturam detalhes cada vez menores. Assim, quanto maior a resolução da medida, maior tende a ser o comprimento obtido. Apesar dessa dependência da escala, em diferentes níveis de observação, a costa mantém um padrão irregular semelhante de curvas.

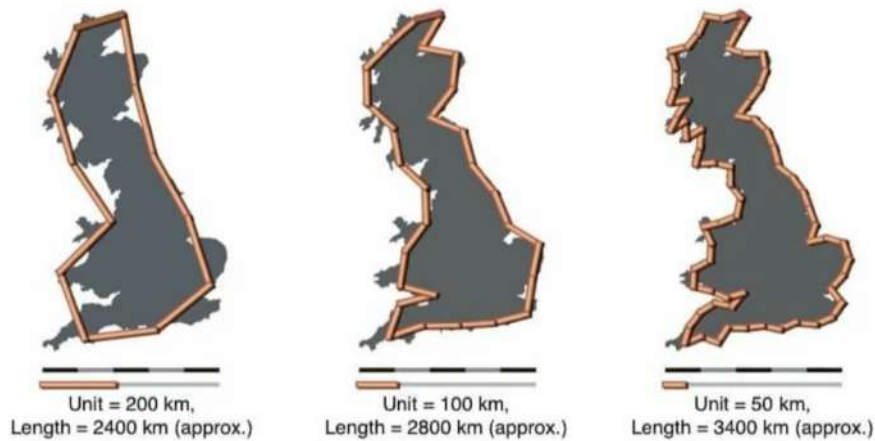


Figura 4. Exemplo de medição da costa britânica. Fonte: <https://www.researchgate.net/>

3.2. Dimensão Fractal

A dimensão fractal é uma medida matemática utilizada para determinar o grau de complexidade de um fractal. Diferentemente da dimensão euclidiana, que assume valores inteiro, onde um ponto tem dimensão 0, uma linha tem dimensão 1, um plano tem dimensão 2 e o volume tem dimensão 3 [Arsie 2009], a dimensão fractal pode assumir valores fracionários, permitindo descrever objetos com elevado grau de irregularidade e complexidade geométrica. Dessa forma, a dimensão fractal fornece uma medida quantitativa da capacidade de um objeto preencher o espaço em que está inserido [Assis et al. 2008]. Existem diversas formas de calcular a dimensão fractal porém este estudo irá abordar apenas duas: Autossimilaridade e Contagem de Caixas.

3.3. Dimensão Fractal por Autossimilaridade

Em estruturas autossimilares exatas, a dimensão fractal está diretamente relacionada à forma como o objeto se modifica quando sua escala é alterada. Considere um objeto que, ao ser reduzido por um fator de escala ε , origina N cópias semelhantes de si mesmo. Nesse caso, a dimensão fractal D pode ser determinada pela relação entre o número de cópias geradas e o fator de escala aplicado:

$$D = \frac{\log(N)}{\log(1/\varepsilon)} \quad (1)$$

Quanto maior o valor da dimensão fractal, maior é a complexidade da estrutura e sua capacidade de ocupar o espaço disponível [Arsie 2009]. No caso do Triângulo de Sierpinski, cada iteração gera três cópias reduzidas da figura original, cada uma com lado igual à metade do triângulo anterior (Figura 3). Portanto, o número de cópias N é 3 e o fator de escala ε é $\frac{1}{2}$. Substituindo esses valores na equação anterior, obtém-se:

$$D = \frac{\log(3)}{\log(2)} \approx 1,58 \quad (2)$$

Esse valor situa-se entre 1 e 2, indicando que o fractal é mais complexo que uma reta, mas não preenche completamente uma região bidimensional do plano.

3.4. Dimensão Fractal por Contagem de Caixas (*Box-Counting*)

Para o cálculo da dimensão fractal de estruturas sem autossimilaridade exata, como a costa britânica (Figura 4), o método mais comumente utilizado é a Contagem de Caixas [Peitgen et al. 2004]. A dimensão é formalmente definida a partir da taxa de crescimento do número de caixas necessárias para cobrir um conjunto quando a escala de observação diminui. Seja $N(\varepsilon)$ o número mínimo de caixas de lado ε necessárias para cobrir o objeto. A dimensão fractal é dada por:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)} \quad (3)$$

Para um objeto fractal, $N(\varepsilon)$ e ε obedecem a lei de potência:

$$N(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-D} \quad (4)$$

Isso significa que cada vez que ε é reduzido, o número de caixas cresce por um fator determinado por D . Essa relação é a generalização do conceito de escala da autossimilaridade para objetos sem fator de redução exato - em vez de um único fator prescrito, analisa-se um intervalo de escalas e observa-se como $N(\varepsilon)$ responde.

Na prática, o procedimento consiste em sobrepor uma grade de caixas de lado ε à figura e contar o número de caixas que interceptam ao menos parte da figura. Esse processo é repetido para diferentes valores de ε , obtendo-se pares $(\varepsilon, N(\varepsilon))$ em múltiplas escalas. Esses pares são então representados como coordenadas de pontos em um gráfico em escala log-log, no qual o eixo horizontal corresponde a $\log(1/\varepsilon)$ e o eixo vertical a $\log(N(\varepsilon))$. Para um comportamento fractal aproximado, os pontos tendem a se alinhar segundo uma relação linear. Nesse caso, realiza-se um ajuste de regressão linear por mínimos quadrados, e o coeficiente angular da reta obtida fornece uma estimativa da dimensão fractal.

$$D \approx \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

A equação 5 apresenta a fórmula utilizada para o cálculo desse coeficiente angular, em que $x_i = \log(1/\varepsilon_i)$ e $y_i = \log N(\varepsilon_i)$ correspondem, respectivamente, às coordenadas horizontal e vertical de cada ponto i no gráfico log-log, para as n escalas analisadas. Os termos $\bar{x}$ e $\bar{y}$ representam as médias aritméticas de x_i e y_i sobre o conjunto dessas escalas.

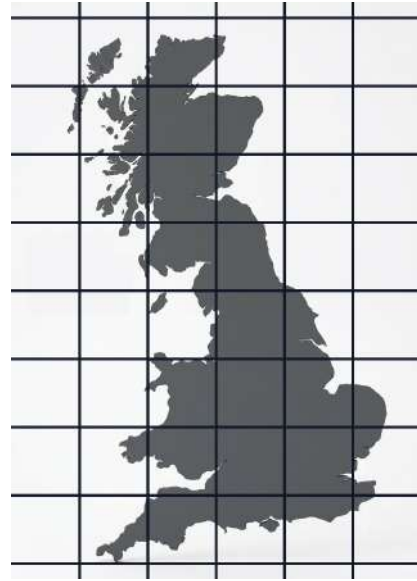
O coeficiente de determinação R^2 do ajuste linear mede o grau de alinhamento dos pontos no gráfico log-log, indicando o quanto o objeto analisado obedece à lei de potência ao longo das escalas utilizadas. Um valor $R^2 = 1$ indica alinhamento perfeito - o objeto exibe invariância de escala exata em toda a faixa analisada, como ocorre em fractais artificiais. Na prática, valores $R^2 \geq 0,99$ são considerados indicativos de um bom ajuste fractal [Peitgen et al. 2004]. Valores baixos sugerem que a lei de potência não

se sustenta nas escalas escolhidas, seja porque o intervalo de escalas é inadequado, seja porque o objeto não apresenta comportamento fractal na faixa analisada.

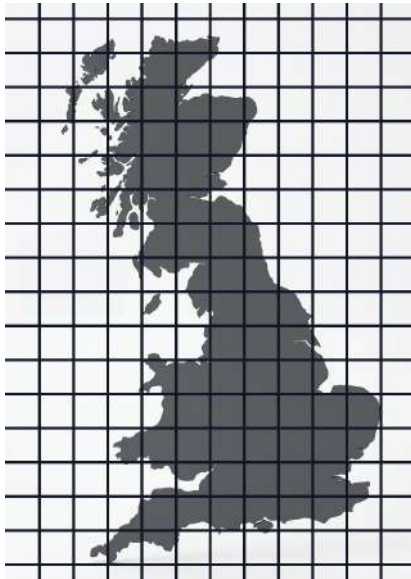
Vejamos o seguinte exemplo de aplicação do método *box-counting* para cálculo da dimensão fractal da costa britânica. Define-se, arbitrariamente com intuito ilustrativo, quatro escalas ε nas quais os quadrados da grade possuem lados de $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{16}$ e $\frac{1}{32}$ do lado da figura. Sobrepe-se as grades sobre a imagem e conta-se o número de quadrados necessários $N(\varepsilon)$ para cobrir toda a imagem (Figura 5), resultando na combinação dos valores $(\varepsilon, N(\varepsilon))$. Com base nestes valores, calcula-se os respectivos logaritmos como mencionado na equação 3.



$$\varepsilon = \frac{1}{4}$$



$$\varepsilon = \frac{1}{8}$$



$$\varepsilon = \frac{1}{16}$$



$$\varepsilon = \frac{1}{32}$$

Figura 5. Exemplo de aplicação do box-counting na costa britânica Fonte: Autor.

A partir desses valores, calculam-se os logaritmos $x_i = \log(1/\varepsilon_i)$ e $y_i = \log N(\varepsilon_i)$, as médias aritméticas $\bar{x}$ e $\bar{y}$, e os desvios e somatórios necessários à estimativa do coeficiente angular da reta pela equação 5, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Dados de contagem de caixas, transformações logarítmicas e cálculo dos somatórios para estimação do coeficiente angular por mínimos quadrados, com $\bar{x} = 1,0536$ e $\bar{y} = 1,7307$.

ε	$N(\varepsilon)$	x_i	y_i	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})^2$
1/4	9	0.6021	0.9542	-0.4515	-0.7764	0.3506	0.2039
1/8	31	0.9031	1.4914	-0.1505	-0.2393	0.0360	0.0227
1/16	101	1.2041	2.0043	0.1505	0.2737	0.0412	0.0227
1/32	297	1.5052	2.4728	0.4515	0.7421	0.3351	0.2039
$\sum$						0.7629	0.4531

$$D \approx \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{0,76}{0,45} \approx 1,68$$

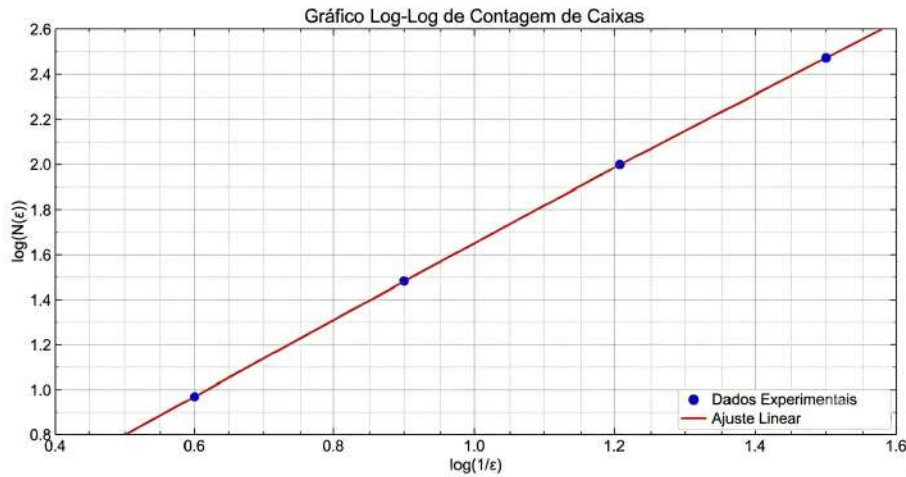


Figura 6. Exemplo de Gráfico *log-log*. Fonte: Autor.

De acordo com a literatura, a dimensão fractal da costa britânica é frequentemente estimada em torno de 1,25 [Mandelbrot 1982], refletindo uma média obtida a partir de análises em múltiplas escalas e diferentes resoluções de medição. No entanto, o valor obtido nesse exemplo foi diferente (aproximadamente 1,68) devido ao número reduzido de escalas utilizadas no cálculo. Em métodos como o *box-counting*, a precisão da dimensão fractal depende fortemente da quantidade e da amplitude das escalas analisadas: quanto maior o número de níveis de escala (ε), mais preciso e confiável se torna o ajuste linear no gráfico log-log. Assim, com poucas escalas, o resultado tende a sofrer maior influência de variações locais da geometria, afastando-se do valor teórico esperado. A escolha das escalas utilizadas neste trabalho será detalhada nas seções 4.3 e 4.4. Aplicando o método com um número maior de escalas, a dimensão estimada para esta mesma imagem é de 1,27.

4. Materiais e Métodos

4.1. Coleta e categorização de dados

Foram realizadas duas análises. A primeira consistiu na comparação direta entre dois grupos (controle x pacientes internados) sem distinção por fatores como artista, período, material de pintura, entre outros. Nesta análise, o grupo de controle continha 1270 pinturas de 348 artistas ocidentais que viveram em períodos diversos entre os séculos 15 e 20. Assumiu-se que estes não sofreram transtornos mentais, dado que não foram encontrados relatos na literatura. As imagens foram baixadas através da API da plataforma *The Metropolitan Museum of Art*². O outro grupo representou 68 artes visuais, incluindo pinturas e desenhos, de 10 artistas do século XIX internados sob diagnóstico de esquizofrenia. As imagens foram baixadas manualmente da plataforma *WikiArt*³ e da coleção *Prinzhorn*⁴.

Na segunda análise, foram coletadas obras de 4 artistas nascidos no século XIX, dentre os quais dois apresentaram quadros clínicos relacionados a esquizofrenia e dois sem relatos associados a doenças mentais. Considerou-se Vincent van Gogh e Louis Wain como artistas com quadros esquizofrênicos e Claude Monet e Camille Pissarro como artistas que não possuem relatos ou evidências substanciais que indiquem transtornos relacionados a esquizofrenia durante sua vida. Coletou-se 782, 41, 410 e 303 imagens de pinturas feitas com tinta a óleo de Vincent van Gogh, Louis Wain, Claude Monet e Camille Pissarro respectivamente (Tabela 2). Todas as imagens utilizadas foram extraídas manualmente da plataforma digital *Wiki Art*. Apenas pinturas à óleo foram consideradas, pois outras modalidades de arte visual, como desenho e ilustrações, costumam ser produzidas com instrumentos diferentes como lápis, giz e, conseqüentemente, apresentam um padrão de traço diferente. Para o caso de Louis Wain, considerou-se tanto desenhos quanto pinturas devido à escassez de imagens de suas obras e também ao fato do artista ser um ilustrador. Além disso, na escolha dos artistas, buscou-se analisar apenas artistas coetâneos com o intuito de diminuir a chance de variação estilística decorrente do período artístico do momento.

Tabela 2. Artistas selecionados para análise.

Artista	Núm. de Pinturas	Sintomas associados à esquizofrenia
Vincent van Gogh (1853-1890)	782	Surtos agressivos com auto-mutilação e suicídio [Blumer 2002]
Louis Wain (1860-1939)	41	Surtos agressivos [McGennis 1999]
Claude Monet (1840-1926)	410	Não há relatos
Camille Pissarro (1830-1903)	303	Não há relatos

²Museu de arte sediado em Nova York, cuja plataforma digital oferece acesso aberto a imagens em alta resolução de seu acervo. Disponível em: <https://www.metmuseum.org>

³Enciclopédia visual online de acesso público a imagens de obras de arte organizadas por artista e período. Disponível em: <https://www.wikiart.org/pt>

⁴Coleção de obras produzidas por pacientes psiquiátricos, publicada pelo psiquiatra Hans Prinzhorn em 1922. Disponível em: <https://publicdomainreview.org/collection/hans-prinzhorn-s-artistry-of-the-mentally-ill-1922/>

Com o intuito de refinar o escopo do estudo, analisou-se a dispersão e média da dimensão fractal das pinturas com o passar dos anos de períodos específicos da vida dos artistas. A ideia principal é verificar se existe alguma relação entre a dimensão fractal de suas pinturas com o agravamento dos sintomas da esquizofrenia, acompanhado pelos episódios de surto psicótico agressivo, como por exemplo o caso em que Van Gogh arrancou sua própria orelha após uma desavença com um parente [Blumer 2002]. Para tal tarefa, separou-se, anualmente, algumas pinturas de um momento da vida de cada artista (Tabela 3). A fim de diminuir a diferença na quantidade de amostras por artistas, foi necessário aumentar o escopo temporal de análise para alguns artistas para englobar mais anos de suas vidas devido à baixa quantidade de obras disponibilizadas por ano.

Além disso, os artistas do grupo de controle, Monet e Pissarro, sofreram comorbidades durante suas vidas que apresentam um potencial de impacto nas suas habilidades artísticas e, conseqüentemente, nas métricas calculadas neste trabalho. Portanto, durante a escolha dos períodos de análise destes artistas, considerou-se apenas momentos anteriores ao surgimento dos primeiros sintomas capazes de influenciar suas produções artísticas. Em relação ao pintor Claude Monet, o período analisado (1864-1879) é antecessor aos momentos de primeiros indícios de catarata, transtorno que poderia limitar a percepção visual e, com isso, alterar o estilo artístico de suas obras produzidas no século XX [de Carvalho 2022]. No caso de Pissarro, a datação das obras analisadas vaga entre 1855 a 1883, período anterior a 1895, ano em que contraiu a sua doença ocular que também oferece um risco de modificação estrutural de suas pinturas. [Marinotti 2012].

Já para os artistas com histórico de esquizofrenia, cobriu-se períodos que abranjem os momentos dos episódios de surto psicótico acompanhado de violência. Para Vincent van Gogh, analisou-se as artes produzidas entre 1881 a 1890 com o objetivo de abranger o período dos episódios psicóticos ocorridos em 1888 e 1890, nos quais o pintor arrancou sua orelha e atirou em seu próprio peito [Blumer 2002]. Em relação a Louis Wain, imagens de suas obras não são apenas escassas como também não possuem datação, o que torna ainda mais difícil o controle temporal da análise. Como delimitador dos períodos das artes de Wain, considerou-se o ano de 1925 para separar suas produções supostamente produzidas antes e depois do seu internato. As imagens com alta abstração e complexidade geométrica foram consideradas como posteriores ao ano de 1925 devido ao surgimento do novo padrão estrutural peculiar conforme o agravamento do quadro esquizofrênico durante a internação [McGennis 1999], enquanto as ilustrações realistas de gatos foram consideradas como anteriores ao ano de 1925.

Tabela 3. Divisão anual de imagens.

Van Gogh				Claude Monet				Louis Wain	
Ano	Núm.	Ano	Núm.	Ano	Núm.	Ano	Núm.	Ano	Núm.
1881	9	1886	82	1864	19	1872	49	< 1925	22
1882	31	1887	127	1865	19	1873	36	≥ 1925	19
1883	15	1888	158	1866	18	1874	40		
1884	33	1889	132	1867	16	1875	3		
1885	91	1890	104	1868	14	1876	30		
				1869	12	1877	15		
				1870	14	1878	34		
				1871	32	1879	28		
Camille Pissarro									
Ano	Núm.	Ano	Núm.	Ano	Núm.				
1855	4	1870	18	1877	18				
1863	6	1871	14	1878	12				
1864	4	1872	36	1879	17				
1865	5	1873	26	1880	9				
1867	7	1874	32	1881	16				
1868	3	1875	25	1882	14				
1869	4	1876	14	1883	19				

4.1.1. Vincent van Gogh

Vincent van Gogh foi um pintor pós-impressionista holandês que viveu entre 1853 e 1890. Ao longo da vida adulta, apresentou episódios recorrentes de instabilidade emocional, alterações de humor, períodos depressivos, crises de ansiedade e distúrbios neurológicos acompanhados por alucinações e delírios transitórios [Blumer 2002]. Os sintomas tornaram-se mais intensos a partir de 1888, culminando em surtos graves de comportamento violento, como a automutilação de sua orelha esquerda após uma crise emocional. Nos anos seguintes, Van Gogh foi submetido a internações psiquiátricas e tratamentos médicos, permanecendo sujeito a recaídas até seu suicídio, ocorrido em julho de 1890 [Blumer 2002]. A análise visual de alguns exemplares de suas pinturas de 1883 até 1890, ano de sua morte, evidencia uma notável mudança no nível de detalhe de suas pinturas. Na Figura 7, as árvores da imagem (a), por exemplo, são desenhadas com traços grossos com baixo nível de detalhe, enquanto as árvores da imagem (c) são representadas com um aumento substancial no grau de detalhamento. Portanto, é razoável levantar a hipótese de uma possível relação entre a mudança na complexidade das pinturas de Van Gogh e seu quadro clínico.



(a) *The Landscape in Drenthe* - 1883.



(b) *The Hill of Montmartre With Quarry* - 1886.



(c) *Avenue in the Park* - 1888.



(d) *Daubigny's Garden* - 1890.

Figura 7. Exemplos de pinturas de Van Gogh. Fonte: WikiArt.

4.1.2. Louis Wain

Louis Wain foi um ilustrador britânico que viveu entre 1860 e 1939, amplamente reconhecido por suas representações antropomórficas de gatos. Durante grande parte de sua carreira artística, produziu desenhos com formas bem definidas e elevado grau de realismo. Entretanto, ao longo da vida adulta, passou a apresentar diversas alterações comportamentais, incluindo isolamento social, desorganização cognitiva e episódios de surto psicótico violentos, sintomas frequentemente associados ao diagnóstico de esquizofrenia atribuído ao artista por médicos da época. Após alguns episódios de violência contra suas irmãs, em 1924, Wain foi internado em instituições psiquiátricas, onde permaneceu por vários anos até sua morte em 1939 [McGennis 1999]. Durante esse período, continuou produzindo obras artísticas porém com uma mudança gradual na organização visual de suas pinturas. Em seus trabalhos mais tardios, nota-se o surgimento de padrões geométricos complexos, formas repetitivas e composições cada vez mais abstratas, como visto na Figura 8, contrastando significativamente com as representações naturalistas de fases anteriores.



(a) *Sem título* - anterior a 1924.



(b) *Sem título* - 1924-1939.

Figura 8. Exemplos de pinturas de Louis Wain. Fonte: WikiArt.

4.1.3. Claude Monet

Claude Monet (1840–1926) foi um dos principais representantes do Impressionismo francês. Diferentemente dos artistas analisados com histórico de transtornos mentais, não há registros biográficos de episódios psicóticos, alucinações, delírios ou comportamento violento ao longo de sua vida. Seus principais problemas de saúde ocorreram na velhice, destacando-se o desenvolvimento progressivo de catarata, condição que comprometeu sua percepção visual e influenciou características estilísticas de suas pinturas tardias no século XX, especialmente no uso das cores e na definição dos contornos [de Carvalho 2022]. Dessa forma, Monet foi utilizado neste estudo como um grupo de comparação sem evidências documentadas de transtornos psicóticos. De acordo com alguns exemplares de pinturas de Monet, o pintor aparenta não ter evoluído o grau de detalhamento de estruturas (Figura 9).



(a) *Woodbearers in Fontainebleau Forest* - 1864.



(b) *Bathers at La Grenouillere* - 1869.



(c) *Amsterdam in the Snow* - 1874.



(d) *Entering the Village of Vetheuil in Winter* - 1879.

Figura 9. Exemplos de pinturas de Claude Monet. Fonte: WikiArt.

4.1.4. Camille Pissarro

Camille Pissarro foi um pintor franco-dinamarquês que viveu de 1830 a 1903 e é não só considerado um dos fundadores do Impressionismo como também uma das principais influências para o desenvolvimento do Pós-Impressionismo. Ao longo de sua vida, não há registros biográficos de transtornos psiquiátricos, episódios psicóticos ou doenças neurológicas capazes de comprometer significativamente sua produção artística. Embora tenha enfrentado uma infecção ocular nos últimos anos de vida, por volta de 1895, a doença aparenta não ter causado alterações cognitivas ou comportamentais que modificassem substancialmente a organização estrutural de suas obras, mas sim limitado a mobilidade do artista, restringindo-o a realizar suas obras em ambientes fechados [Marinotti 2012]. Dessa forma, Pissarro foi utilizado neste estudo como mais um grupo de comparação sem histórico documentado de transtornos psicóticos ou neurodegenerativos. A observação de algumas de suas pinturas produzidas entre 1865 e 1880 (Figura 10) indica relativa estabilidade na organização visual das cenas e no nível de detalhamento das estruturas representadas, não sendo observadas mudanças notáveis de complexidade semelhantes às descritas em artistas com transtornos neurológicos.



(a) *Barges at Le Roche Guyon* - 1865.



(b) *Upper Norwood Chrystal Palace London* - 1870.



(c) *Rolling Landscape in Winter* - 1875.



(d) *Landscape near Pontoise* - 1880.

Figura 10. Exemplos de pinturas de Camille Pissarro. Fonte: WikiArt.

4.2. Normalização de resolução

Inicialmente, é necessário relembrar dois conceitos importantes. O primeiro conceito é que a dimensão fractal de uma imagem representa o nível de complexidade da sua estrutura. O segundo é que nível de detalhamento da imagem depende de sua resolução - quanto maior a resolução, mais pixels são utilizados para representar a imagem e, consequentemente, maior detalhamento dos traços. Com o intuito de estabelecer uma base comum para a comparação das imagens, é necessário determinar um padrão de resolução. Note que a diferença da dimensão fractal entre duas imagens pode acontecer devido à diferença entre resoluções e não por uma característica fractal do artista. Por exemplo, uma breve análise comparativa da pintura *A Group Of Cottages* de Van Gogh (Figura 11), que possui resolução original de 2153px, demonstra a variação da dimensão fractal em resoluções diferentes. Calculou-se a dimensão fractal da mesma imagem para quatro resoluções distintas: resolução original, 1024, 512 e 256 pixels no lado maior (Tabela 4). Observou-se variação de até 0,04 na dimensão fractal de uma mesma imagem entre resoluções distintas, como por exemplo entre 256px e 2153px. Com base nessa análise, adotou-se 512 pixels como resolução padronizada.



Figura 11. A Group Of Cottages - Van Gogh 1890. Fonte: WikiArt

Tabela 4. Comparação da dimensão fractal por resolução da Figura 11

Resolução	Dimensão Fractal
Original (2153 px)	1,9210
1024 px	1,8925
512 px	1,8956
256 px	1,8805

Outra justificativa para a escolha dessa resolução se dá pelo fato de que 40% das imagens utilizadas no estudo são de resolução entre 512px e 1023px e decidiu-se mantê-las no estudo devido ao difícil acesso a grandes quantidades de imagens de pinturas em alta resolução dos artistas contemplados na pesquisa.

4.3. Definição de Escalas

No método *box-counting*, a escala ε representa a razão entre o lado da caixa e o maior lado da imagem analisada - uma medida relativa ao objeto, não ao instrumento. A definição das escalas é uma escolha pois, segundo Mandelbrot, a dimensão fractal não é uma propriedade observável em uma única escala, mas sim um invariante que emerge da relação entre escalas. Para um objeto fractal, a cada vez que ε é reduzido, o número de caixas necessárias $N(\varepsilon)$ cresce segundo a lei de potência mencionada na Seção 3.4 (Equação 4). É essa regularidade, verificada ao longo de todo o intervalo de escalas, que permite estimar a dimensão D pelo coeficiente angular da reta no gráfico $\log N(\varepsilon)$ vs $\log(1/\varepsilon)$.

Neste trabalho, a escala mínima foi fixada como a razão entre 2 pixels e o maior lado da imagem $d_{\max}$, garantindo que cada caixa cubra ao menos 2 pixels e evitando instabilidade numérica em escalas subpixel. A escala máxima foi fixada em 0,25, correspondente a caixas que cobrem 1/4 da imagem:

$$\varepsilon_{\min} = \frac{2}{d_{\max}}, \quad \varepsilon_{\max} = 0,25 \quad (6)$$

Por exemplo, para uma imagem de 512px, a escala máxima ($\varepsilon_{\max} = 0,25$) corresponde a caixas de 128 pixels (Figura 12), enquanto a escala mínima ($\varepsilon_{\min} = 2/512 \approx 0,0039$) corresponde a caixas de 2 pixels (Figura 13). Cada escala sonda a estrutura da imagem em um nível de detalhe diferente. Escalas finas capturam micro variações dos traços, enquanto escalas grosseiras capturam a organização global da estrutura. É a progressão conjunta de todos esses níveis que determina a dimensão fractal.

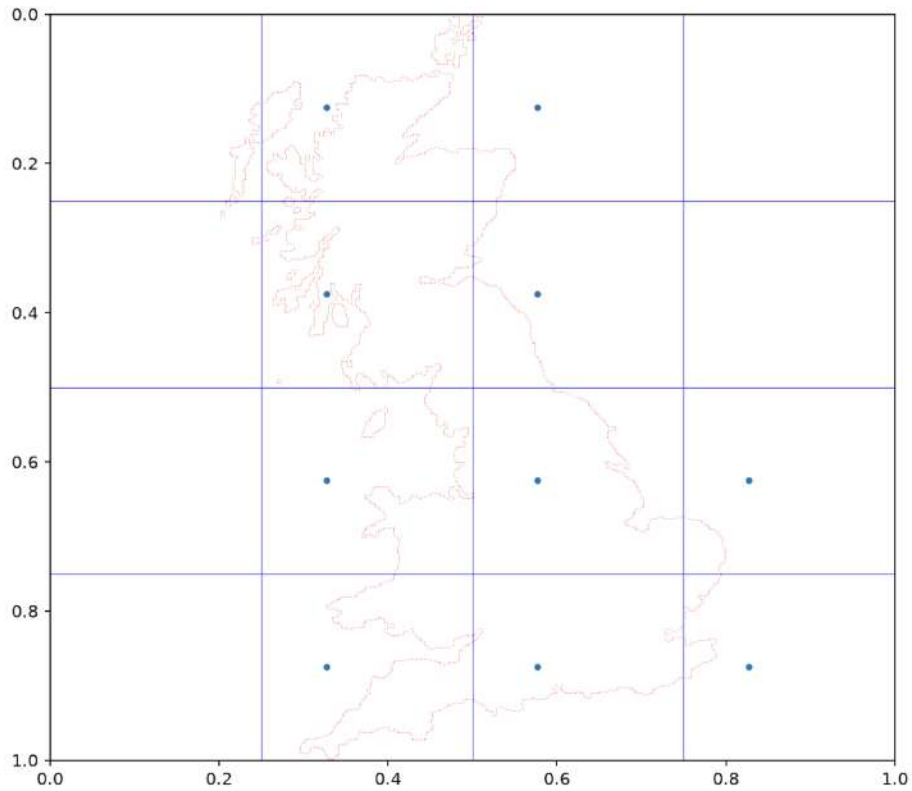


Figura 12. Grade de caixas com escala $\varepsilon = 0,25$ (128 px) sobreposta à costa britânica. Fonte: Autor.

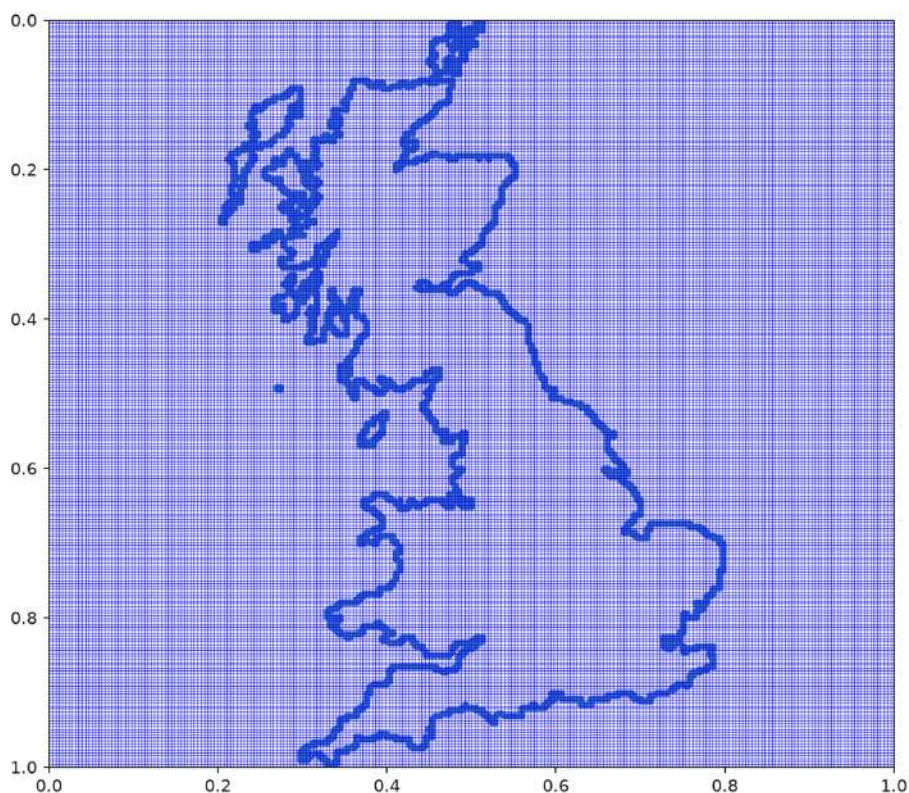


Figura 13. Grade de caixas com escala $\varepsilon \approx 0,0039$ (2 px) sobreposta à costa britânica. Fonte: Autor.

Incluindo o limite mínimo ($\varepsilon_{\min}$) e máximo ($\varepsilon_{\max}$), definiu-se 10 escalas com espaçamento uniforme em escala logarítmica. Como a dimensão é estimada pelo coeficiente angular da reta no espaço log-log, o espaçamento logarítmico garante que cada nível de detalhe contribua com peso igual para a regressão pois escalas lineares dariam peso desproporcional às escalas finas e distorceriam a estimativa.

4.4. Avaliação da Precisão do Box-Counting

Nesta seção, avalia-se a precisão da implementação do método de *box-counting* utilizado neste trabalho para estimar a dimensão fractal nos exemplos citados na Seção 3.1. O código foi extraído de um repositório público⁵ disponibilizado por um estudo sobre dimensão fractal aplicado ao comportamento animal [Cui and Wang 2024]. O objetivo é verificar se, através da aplicação computacional, o algoritmo é capaz de produzir estimativas confiáveis da dimensão fractal. Para validar a implementação, foram retomadas as análises das duas estruturas citadas anteriormente cujas dimensões fractais são conhecidas na literatura - o Triângulo de Sierpinski, cuja dimensão teórica é aproximadamente 1,585, e a costa da Grã-Bretanha, cuja dimensão é frequentemente reportada em torno de 1,25. Nas seções 3.3 e 3.4, o cálculo foi feito com poucos números de escalas. Agora, aproveitando o poder computacional, recalculemos utilizando o número e tamanho adequado de escalas com base nas dimensões da imagem. É esperado que, após sucessivas ampliações da imagem por meio da redução do tamanho das caixas, as estimativas ob-

⁵Fractal Dimension Estimation Toolbox. Disponível em: <https://github.com/wanglab-georgetown/fractal>

tidas pelo algoritmo apresentem convergência para os valores conhecidos na literatura, evidenciando a precisão e a consistência da implementação proposta.

No caso do Triângulo de Sierpinski, as escalas do *box-counting* correspondem diretamente às iterações de construção da figura pois, por ser um fractal artificial com autossimilaridade exata, cada nível de ampliação revela apenas cópias reduzidas da estrutura global. Efetuando o cálculo da dimensão para as cinco primeiras iterações, é possível notar que a dimensão tende a aumentar. Na quinta iteração, atinge o valor 1,59, bem próximo do valor exato calculado: 1,58 (Tabela 5).

Tabela 5. Tendência de convergência da dimensão fractal para as iterações do Sierpinski com *box-counting*.

Iteração	Dimensão
0	1.25
1	1.32
2	1.39
3	1.51
4	1.60
5	1.59

Diferentemente do exemplo anterior, no qual quatro escalas foram escolhidas arbitrariamente com fins didáticos, o cálculo da dimensão fractal da costa britânica utilizado efetivamente neste trabalho considera um conjunto mais amplo de escalas, definidas a partir da resolução da imagem conforme detalhado na seção 4.3. Repetindo o método de *box-counting* para as dez escalas e aplicando a Equação 5 sobre a totalidade dos pontos $(\varepsilon, N(\varepsilon))$, obtêm-se os valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Cálculo do coeficiente angular por mínimos quadrados para a costa britânica, considerando o conjunto completo de escalas utilizado neste trabalho ($\bar{x} = 3,4657$; $\bar{y} = 5,1485$).

ε	$N(\varepsilon)$	x_i	y_i	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})^2$
0.0039	2130	5.5452	7.6639	2.0794	2.5154	5.2306	4.3241
0.0062	1310	5.0831	7.1778	1.6173	2.0293	3.2821	2.6158
0.0098	766	4.6210	6.6412	1.1552	1.4927	1.7244	1.3346
0.0156	436	4.1589	6.0776	0.6931	0.9292	0.6441	0.4805
0.0248	248	3.6968	5.5134	0.2310	0.3650	0.0843	0.0534
0.0394	141	3.2347	4.9488	-0.2310	-0.1997	0.0461	0.0534
0.0625	76	2.7726	4.3307	-0.6931	-0.8177	0.5668	0.4805
0.0992	44	2.3105	3.7842	-1.1552	-1.3643	1.5761	1.3346
0.1575	21	1.8484	3.0445	-1.6173	-2.1039	3.4028	2.6158
0.2500	10	1.3863	2.3026	-2.0794	-2.8459	5.9179	4.3241
Σ						22.4753	17.6166

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{22,4753}{17,6166} \approx 1,28$$

Com o conjunto adequado de escalas, a estimativa da dimensão fractal aproximou-se do valor conhecido na literatura para a costa britânica [Mandelbrot 1982], evidenciando que, ao contrário do exemplo simplificado de quatro escalas (que resultou em $D \approx 1,68$), a ampliação do número e da amplitude das escalas analisadas leva a uma estimativa mais precisa e consistente da dimensão fractal do objeto.

4.5. Cálculo da dimensão fractal

Todas as etapas computacionais desta seção foram implementadas em *Python*, utilizando as bibliotecas de código aberto *OpenCV* (*Open Source Computer Vision*) para leitura e processamento das imagens, *NumPy* para operações com matrizes e logaritmos, *SciPy* para a regressão estatística e *Matplotlib* para a geração das figuras e gráficos. Todo o processamento foi executado localmente, em máquina pessoal, sem uso de infraestrutura de computação em nuvem. Antes do cálculo, foi necessário processar as imagens para extrair os dados necessários para a aplicação computacional do método *box-counting*. Como ilustrado na Figura 14, o processamento de cada imagem se deu através das seguintes etapas:

- (i) redimensionamento para 512px;
- (ii) conversão para escala de cinza;
- (iii) detecção de bordas com o método Canny, extraíndo os traços estruturais da obra;
- (iv) normalização das coordenadas dos pontos de borda para o intervalo $(0, 1)$.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 14. Pré-processamento de imagem. As figuras (a), (b), (c) e (d) representam as etapas (i), (ii), (iii) e (iv), respectivamente. Fonte: Autor.

Na etapa (i), a partir das dimensões originais da imagem, calculou-se um fator de escala correspondente à razão entre 512 e a maior dimensão (largura ou altura). Em seguida, gerou-se as dimensões da nova imagem através da multiplicação das dimensões originais pelo fator de escala calculado, preservando a proporção original. A conversão foi realizada com a técnica de interpolação por área, resultando em uma nova imagem com a maior dimensão igual a 512 pixels.

Nas etapas (ii) e (iii), respectivamente, a imagem redimensionada, originalmente colorida na escala RGB, foi convertida para escala de cinza e submetida ao detector de bordas de Canny, também disponibilizado pelo *OpenCV*, com limites fixos 50 e 150. O resultado é um mapa binário de bordas no qual elementos com valor 255 representam um pixel ativo corresponde a um traço estrutural da obra e elementos com valor 0 representam o plano de fundo ou não-borda da imagem.

Na etapa (iv), as coordenadas de todos os pixels de borda foram extraídas e normalizadas para o intervalo $(0, 1)$ através do *NumPy*. A normalização preserva a proporção original da imagem pois as coordenadas são deslocadas para que a caixa delimitadora co-

mece na origem e, em seguida, divididas por sua maior dimensão (largura ou altura), de forma que toda a imagem esteja em um quadrado unitário, sem distorções. Uma pequena margem ($\epsilon = 10^{-10}$) é aplicada para que nenhum ponto fique exatamente sobre os limites 0 ou 1, evitando erros de indexação nas etapas seguintes.

A partir da figura de pontos normalizada, aplicou-se o algoritmo de *box-counting* com 10 escalas, como detalhado na Seção 4.4, e a dimensão fractal foi dada pelo coeficiente angular da regressão linear de $\log N(\epsilon)$ em função de $\log(1/\epsilon)$ através da biblioteca *SciPy*. Além do coeficiente angular, o coeficiente de determinação R^2 também foi calculado pela mesma biblioteca. Considerou-se apenas valores de R^2 superiores a 0,98 como critério de confiabilidade da estimativa.

4.6. Análise e visualização dos dados

Após o cálculo da dimensão fractal de cada imagem, os valores foram salvos em arquivo em formato *json* no qual as chaves representam os períodos das pinturas e os valores representam as métricas calculadas de cada imagem, incluindo nome do arquivo, dimensão fractal e coeficiente de determinação. A partir deste arquivo, usando a biblioteca *matplotlib*, gráficos de dispersão e tendência foram criados para facilitar a visualização dos dados.

Todo o código utilizado está publicado em um repositório no GitHub, disponível no endereço: <https://github.com/ARodrigo2001/fractal>

4.7. Protótipo

Como forma de viabilizar a aplicação prática dos resultados obtidos, realizou-se a integração do código desenvolvido neste trabalho à plataforma ZophIA⁶. Atualmente, o sistema dispõe de uma funcionalidade capaz de extrair indicadores quantitativos a partir de gravações de voz, os quais são utilizados em pesquisas relacionadas à identificação de padrões associados a esquizofrenia. A integração do algoritmo proposto neste trabalho amplia esse conjunto de métricas ao incorporar a análise da dimensão fractal de imagens, oferecendo uma medida quantitativa complementar às informações obtidas por meio da voz.

Para a arquitetura da integração proposta, a lógica de processamento foi disponibilizada como um *endpoint* da API do ZophIA. Ao receber a imagem de um desenho ou pintura, o serviço executa automaticamente todas as etapas do processamento, retornando a dimensão fractal estimada, o coeficiente de determinação do ajuste e, opcionalmente, as visualizações intermediárias do processo, como as grades utilizadas pelo método *box-counting*. Dessa forma, a dimensão fractal passa a compor, juntamente com os indicadores extraídos da voz, um conjunto de métricas quantitativas que poderá auxiliar pesquisas futuras sobre a correlação entre características da produção artística e outros dados computacionais obtidos de um mesmo paciente.

⁶Sistema digital que oferece soluções tecnológicas, baseadas em inteligência artificial, para o contexto da psiquiatria. Disponível em: <https://zophia.tech/>

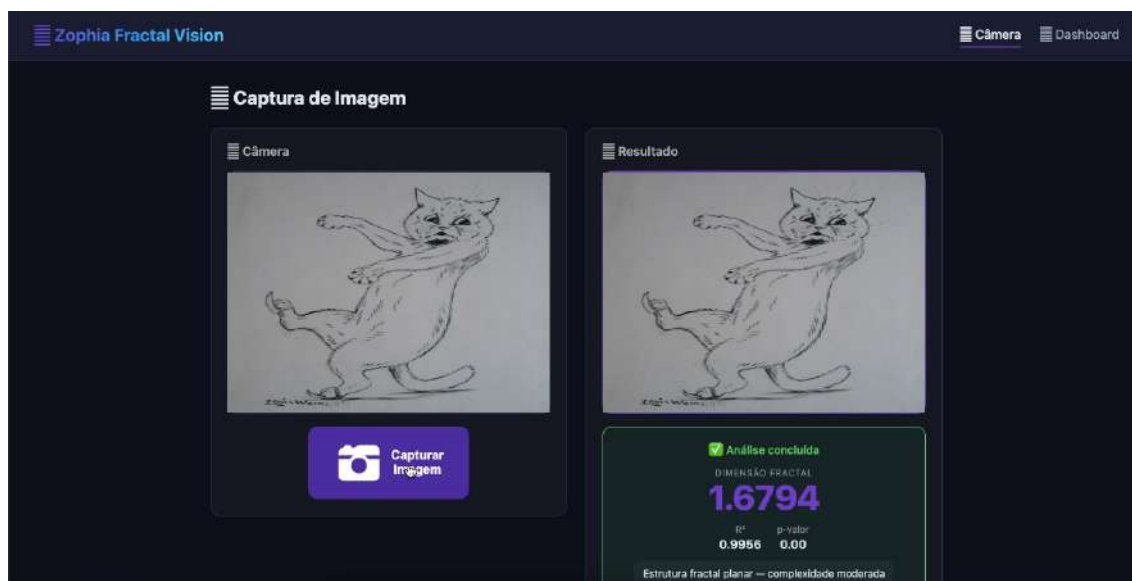


Figura 15. Imagem do protótipo integrado à ZophIA com exemplo ilustrativo de cálculo de dimensão fractal. Fonte: Autor.

5. Resultados

Nesta seção, serão apresentados os resultados das duas análises descritas na Seção 4.1. A primeira, uma análise abrangente e com baixo grau de refinamento quanto ao escopo, é apresentada na Seção 5.1. A segunda, realizada individualmente para cada artista selecionado, com maior nível de granularidade, é apresentada nas subseções seguintes, uma para cada pintor analisado. Os resultados de ambas as análises são ilustrados por meio de dois tipos de gráficos - dispersão e tendência.

O gráfico de dispersão, o eixo X representa os anos analisados, enquanto o eixo Y representa os valores de dimensão fractal, variando de 1.0 a 2.0. Para cada ano, a forma do violino ilustra a distribuição dos valores de dimensão fractal das pinturas daquele período, com uma linha central indicando a mediana. Sobre cada violino, pequenos círculos coloridos representam individualmente cada pintura analisada naquele ano, permitindo visualizar tanto a dispersão dos dados quanto os valores específicos de cada obra, enquanto o sombreamento ao redor do violino representa a densidade de distribuição dos valores. Complementarmente, para visualizar a evolução temporal da dimensão fractal, utilizou-se um gráfico de tendência, no qual o eixo X representa os anos analisados e o eixo Y representa a média da dimensão fractal das pinturas de cada ano. Uma linha conecta os valores médios ano a ano, enquanto uma faixa sombreada ao seu redor indica o desvio padrão, permitindo observar tanto a tendência geral ao longo do tempo quanto a variabilidade dos valores dentro de cada ano.

5.1. Análise Abrangente

A Figura 16 apresenta o gráfico de dispersão resultante da comparação, reunindo os valores de dimensão fractal calculados para o conjunto total de pinturas dos dois grupos, sem distinção por artista ou período. Inicialmente, percebe-se a drástica diferença na quantidade de amostras de cada grupo, principalmente, em decorrência da dificuldade de acesso às obras dos artistas da coleção Prinzhorn. As imagens utilizadas no estudo foram

extraídas de plataformas auxiliares que também não têm acesso direto às mais de 20.000 imagens em posse da curadoria da coleção. Ainda assim, com base no gráfico, nota-se que os grupos analisados tiveram uma notável diferença na amplitude nos valores da dimensão fractal de suas imagens. As obras do grupo de controle apresentaram dimensões partindo do valor mínimo 1.0, até o valor máximo, aproximadamente, 1.95, enquanto o grupo de Prinzhorn apresentou amplitude de 1.35 a 1.95, evidenciando uma pequena margem diferencial de 0.35. Apesar dessa interpretação, é importante ressaltar, contudo, que a natureza agregada dessa análise limita significativamente a confiabilidade das possíveis conclusões. Os grupos comparados reúnem diversas variáveis em condições distintas como período de vida de artistas, movimento artístico, quantidade de amostras, além de diferenças relevantes quanto ao material das obras. Devido à desconexão das variáveis, os padrões estruturais das obras podem divergir substancialmente e, conseqüentemente, mascarar possíveis variações na dimensão fractal das pinturas em decorrência, por exemplo, da natureza do movimento artístico da época, e não da particularidade motora do artista.

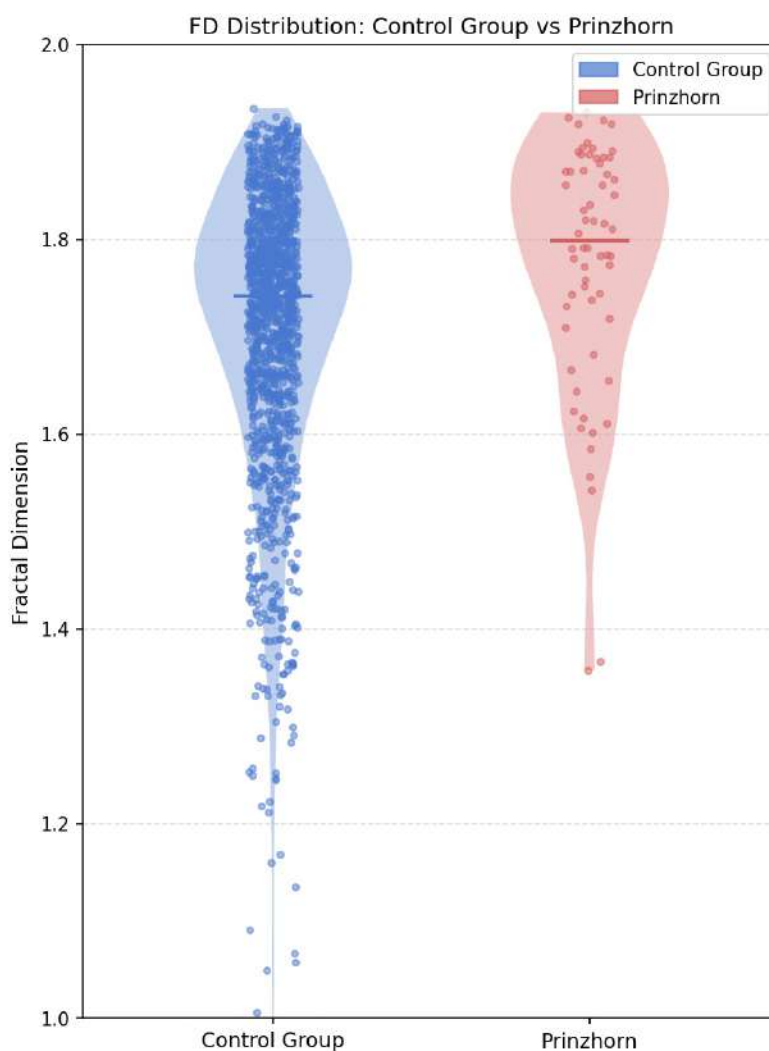


Figura 16. Gráfico de dispersão da análise abrangente. Fonte: Autor

5.2. Análise Temporal por Artista

5.2.1. Vincent van Gogh

Com o intuito de responder à hipótese levantada, na Seção 4.1.1, a respeito da possível variação da dimensão fractal de algumas pinturas produzidas pelo artista ao longo dos anos, realizou-se inicialmente uma comparação entre as imagens apresentadas na Figura 7, referente aos anos 1883, 1886, 1888 e 1890. Estas apresentaram valores de dimensão fractal de 1.67, 1.77, 1.89 e 1.89, respectivamente. Com isso, é possível notar um aumento de até 0.22 na dimensão fractal entre 1883 e 1890. Uma análise mais abrangente, envolvendo diversas pinturas de cada ano da última década produtiva do pintor, 1881 a 1890, reproduziu esse padrão de crescimento. Os resultados (Figura 17) demonstraram uma tendência linear positiva na dimensão fractal das pinturas ao longo desse período. Nos dois anos antecessores ao ano de seu surto psicótico, 1886 e 1887, nota-se o início de uma abrupta concentração e constância da dimensão fractal das suas pinturas em torno de 1.7 a 1.9. Adicionalmente, também é possível observar essa concentração substancial dos valores de dimensão fractal através da redução da dispersão dos valores individuais ao passar dos anos. Analisando os valores mínimos e máximos da dimensão fractal das pinturas de cada ano, em 1881, os obras tiveram variação máxima de 0.53 (1.35 e 1.88), enquanto em 1890 essa variação estreitou-se em 0.24 (1.69 e 1.93), evidenciando a redução de dispersão mencionada nas obras dos últimos anos próximos aos episódios de surto.

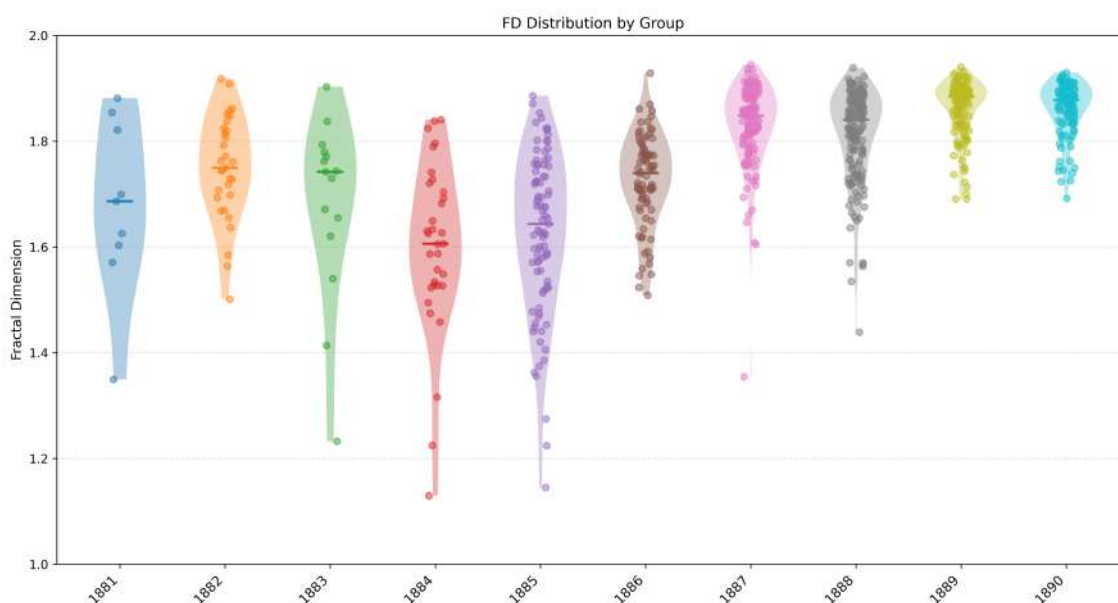


Figura 17. Gráfico de dispersão de Van Gogh. Fonte: Autor

Ademais, o gráfico de tendência (Figura 18) reforça este padrão. A dimensão fractal média das pinturas cresce 0.19 ao longo da última década produtiva de Van Gogh, partindo de 1.67 em 1881 e atingindo 1.86 em 1890, com uma queda pontual em 1884. Além do aumento gradual, com valor inicial e final de 0.157 e 0.052, respectivamente, nota-se uma redução progressiva na faixa de desvio padrão ao redor da média, o que indica que, com o passar dos anos, a dimensão fractal das pinturas de Van Gogh tornou-se

mais consistente entre as obras de um mesmo período.

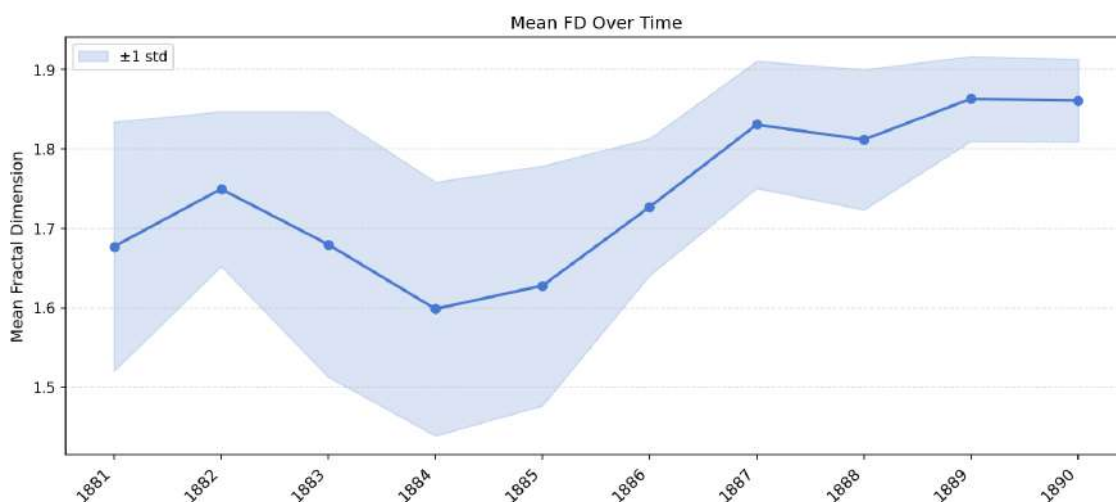


Figura 18. Gráfico de tendência de Van Gogh. Fonte: Autor

5.2.2. Louis Wain

Realizou-se também uma análise das pinturas de Louis Wain, artista frequentemente citado na literatura popular devido à notável mudança nos padrões estruturais de suas pinturas durante a progressão de seu quadro de esquizofrenia, agravado a partir de sua internação em instituições psiquiátricas em 1924. Repetindo a lógica de comparação de pinturas apresentadas na Seção 4.1.2, o cálculo da dimensão fractal das imagens (Figura 8 resultou em valores de 1.56 e 1.88 respectivamente. Portanto, nota-se uma variação de até 0.32 na dimensão fractal decorrente da complexidade estrutural da obra mais recente.

Diferentemente dos demais artistas analisados, grande parte das pinturas de Wain não possui datação precisa, o que impossibilitou uma análise ano a ano. Portanto, optou-se por agrupar as obras em dois períodos, anteriores e posteriores a 1925. Os resultados obtidos estão representados na Figura 19. O período anterior a 1925, com 22 pinturas, apresentou dimensão fractal média de 1.71, com valores individuais variando entre 1.50 e 1.87, enquanto o período posterior a 1925, com 19 pinturas, apresentou média de 1.82, com valores concentrados entre 1.75 e 1.90. Observa-se, assim, um aumento de aproximadamente 0.11 na dimensão fractal média entre os dois períodos, acompanhado por uma redução expressiva na dispersão dos valores, tendo o período pré-internação com variação de 0.37 e o período pós-internação com variação de 0.25. Além disso, o desvio padrão é reduzido a menos da metade do observado no período anterior a 1925. Esse padrão de aumento da dimensão fractal média associado à concentração progressiva dos valores individuais aproxima-se do comportamento identificado em Van Gogh.



Figura 19. Gráfico de dispersão de Louis Wain. Fonte: Autor

O gráfico de tendência (Figura 20) também evidencia essa transição entre os dois períodos pois a dimensão fractal média salta de 1.71 antes de 1925 para 1.82 após essa data, enquanto a faixa de desvio padrão ao redor da média é visivelmente reduzida no segundo período. É importante ressaltar, contudo, que essa comparação possui caráter mais qualitativo do que as análises anuais realizadas para os outros artistas, uma vez que a ausência de datação precisa para boa parte do acervo de Wain, em conjunto com a escassez de amostras, impede a construção de uma série temporal contínua e robusta. Ainda assim, o resultado é compatível com o observado nos resultados de Van Gogh pois as obras de Louis Wain também apresentam uma concentração progressiva da dimensão fractal ao longo da carreira do artista.

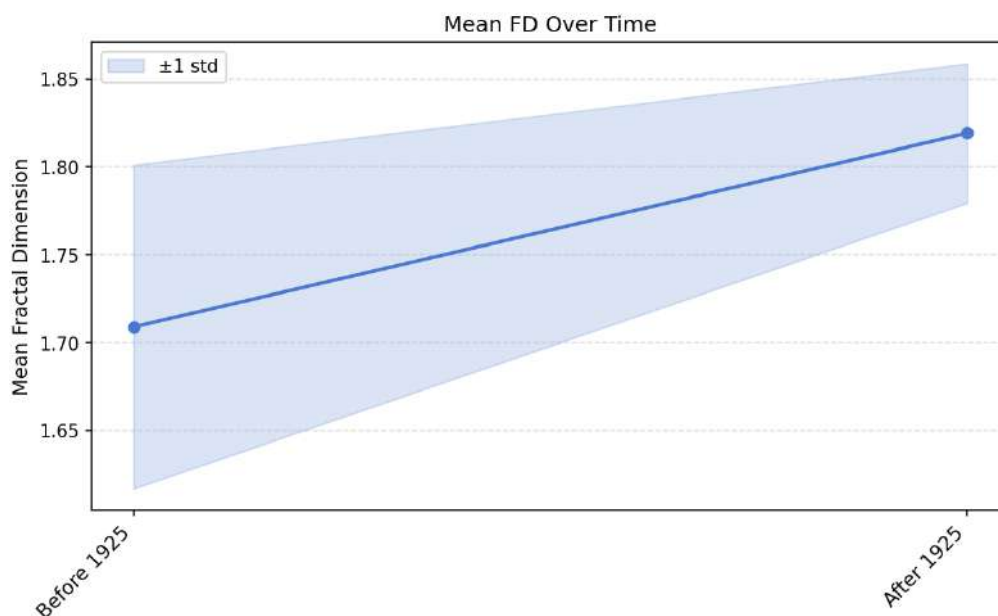


Figura 20. Gráfico de tendência de Louis Wain. Fonte: Autor

5.2.3. Claude Monet

Visando verificar se a tendência observada em artistas enfermos é um padrão específico de suas trajetórias ou algo mais geral entre pintores, realizou-se uma análise equivalente com pinturas de Claude Monet, utilizado aqui como grupo de controle por não estar associado a transtornos neurológicos. Uma rápida comparação entre pinturas dos anos 1864, 1869, 1874 e 1879 (Figura 9) apresentou valores de dimensão fractal de 1.70, 1.82, 1.78 e 1.83, respectivamente. Com isso, nota-se um aumento de até 0.13 na dimensão fractal entre 1864 e 1879, um valor em conformidade com o observado em Van Gogh. Contudo, diferentemente do holandês, a análise temporal, envolvendo diversas pinturas de cada ano do período de 1864 a 1879, reforça uma notável diferença na taxa de crescimento. Os resultados (Figura 21) não demonstram uma tendência linear positiva tão forte quanto a observada em Van Gogh. Por exemplo, analisando a dimensão fractal média do menor e maior ano, a média sai de 1.74 em 1864 e chega a 1.82 em 1879, um aumento de apenas 0.08 ao longo de 15 anos, em contraste substancial ao crescimento visto em Van Gogh que apresentou variação de 0.19. Quanto à dispersão dos valores individuais, ao contrário de uma redução na dispersão, nota-se uma estabilidade entre o início e fim do período. No ano inicial, 1864, a variação máxima foi de 0.23, tendo 1.62 e 1.85 como valores limite, enquanto o último ano, 1879, apresentou uma amplitude de 0.22, tendo 1.70 e 1.92 como limites. Esse comportamento contrasta com a redução de 0.29 observada em Van Gogh, sugerindo que a concentração progressiva da dimensão fractal ao longo da carreira talvez não seja uma característica universal, podendo estar associada a fatores específicos da trajetória de cada pintor.

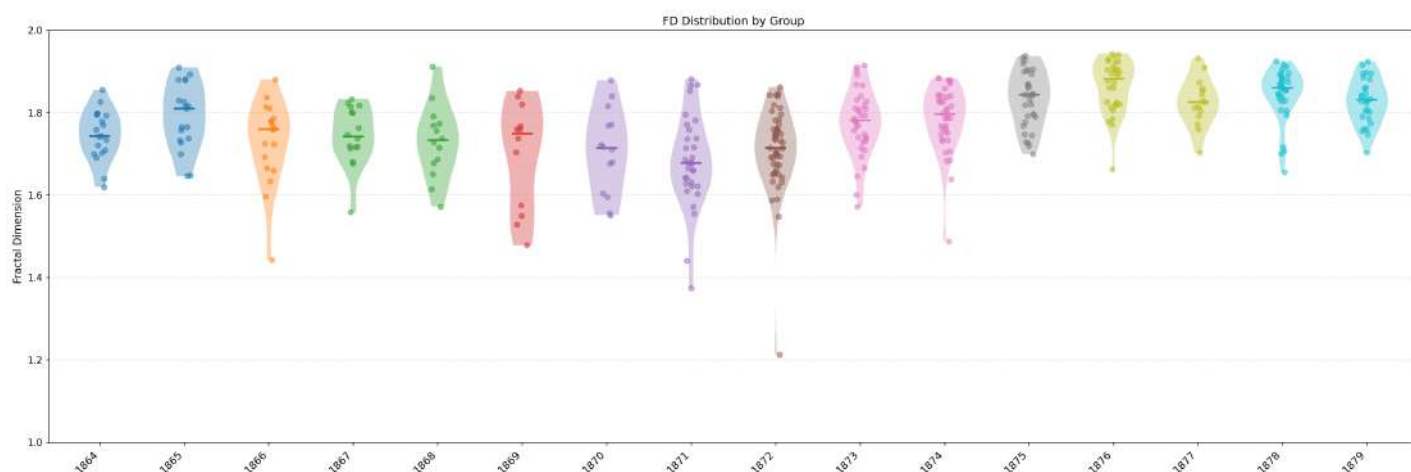


Figura 21. Gráfico de dispersão de Claude Monet. Fonte: Autor

Ademais, o gráfico de tendência (Figura 22) reforça a divergência na taxa de crescimento com mais clareza. A dimensão fractal média das pinturas de Monet não segue um crescimento monotônico e abrupto como em Van Gogh. A média anual parte de 1.75 em 1864, recua para 1.70 em 1869, sobe até um pico de 1.86 em 1876 e volta a cair para 1.83 em 1879. A faixa de desvio padrão ao redor da média também não se reduz de forma constante, mantendo-se relativamente similar por volta de 1864 e 1879.

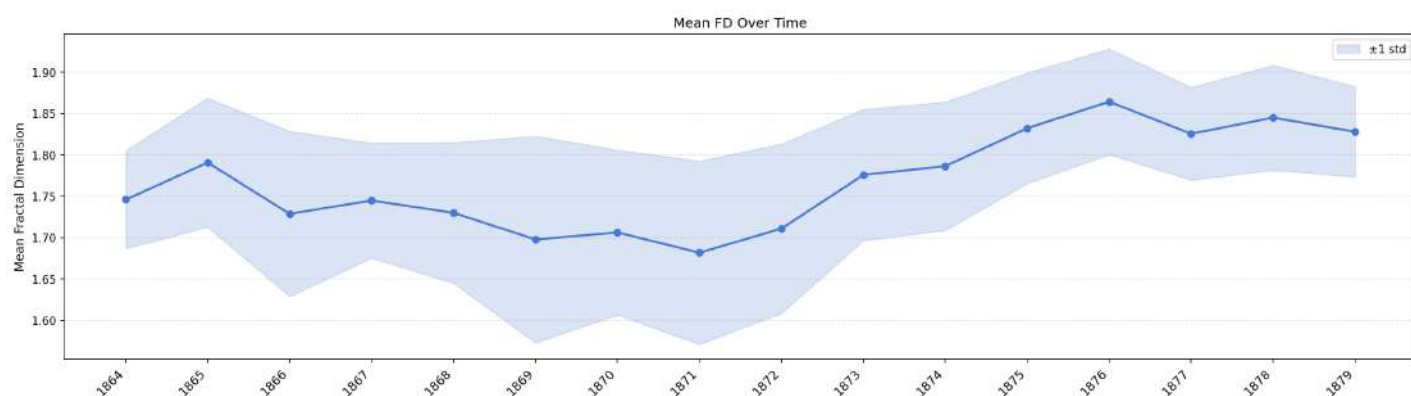


Figura 22. Gráfico de tendência de Claude Monet. Fonte: Autor

5.2.4. Camille Pissaro

Também como objeto do grupo de controle, realizou-se uma rápida comparação entre pinturas dos anos 1865, 1870, 1875 e 1880 do pintor Camille Pissarro e os resultados apresentaram um crescimento de 0.28 através dos valores de dimensão fractal de 1.49, 1.69, 1.57 e 1.77, respectivamente. De forma complementar à análise realizada com Claude Monet, buscou-se avaliar se o padrão de crescimento observado em Van Gogh também se manifesta em outro artista sem relatos de transtornos neurológicos. Para tanto, apesar da tendência positiva observada nas quatro pinturas mencionadas, analisou-se o grupo maior das pinturas, totalizando 303 obras produzidas entre 1855 e 1883. Os resultados (Figura 23) indicam uma tendência geral de crescimento da dimensão fractal ao longo

do período, porém com um comportamento similar ao de Claude Monet ao invés de Van Gogh. A média fractal apresenta uma variação de 0.11, partindo de 1.73 nos primeiros anos analisados e atingindo 1.84 nos últimos anos. Além disso, assim como também observado em Monet, esse crescimento da dimensão fractal avança gradualmente, apenas com uma queda expressiva em 1865, ano em que a dimensão fractal média cai para 1.61.

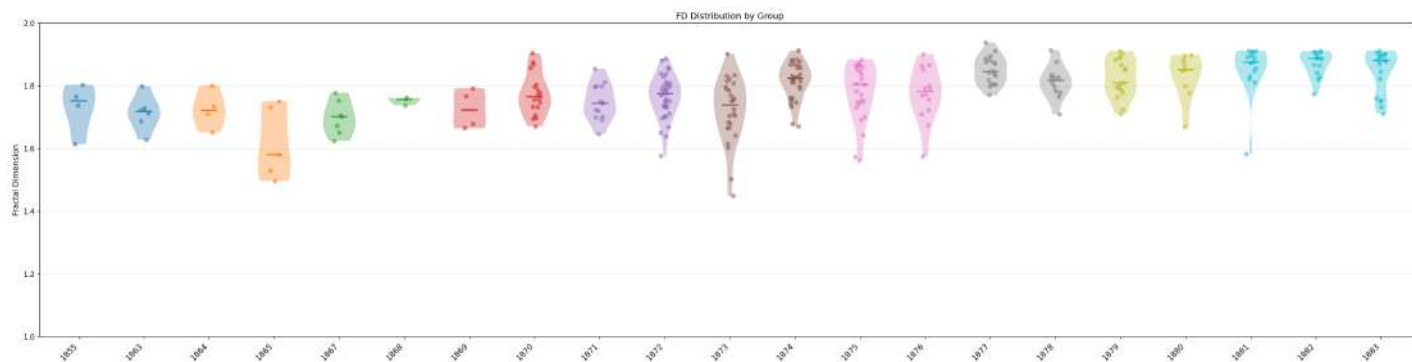


Figura 23. Gráfico de dispersão de Camille Pissarro. Fonte: Autor

Quanto à dispersão dos valores individuais, o comportamento de Pissarro também se aproxima mais do observado em Monet do que do padrão de concentração progressiva identificado em Van Gogh. Camille apresentou uma variação de 0.02, tendo a amplitude inicial e final como 0.18 e 0.16. Além disso, o desvio padrão anual não apresenta uma redução ao longo da série pois a métrica inicia-se em 0.071 e finaliza em 0.067. O gráfico de tendência (Figura 24) evidencia esse comportamento pois a faixa de desvio padrão ao redor da média alterna ao longo dos anos, sem tendência de estreitamento progressivo verificado em Van Gogh e terminando com uma largura similar à inicial. Esse resultado reforça, portanto, a partir de um segundo grupo de controle, a hipótese levantada com Monet de que a concentração progressiva da dimensão fractal ao longo da carreira não constitui um comportamento generalizável a todos os pintores, podendo estar associada a fatores específicos da trajetória de artistas com quadros neurológicos, como Van Gogh.

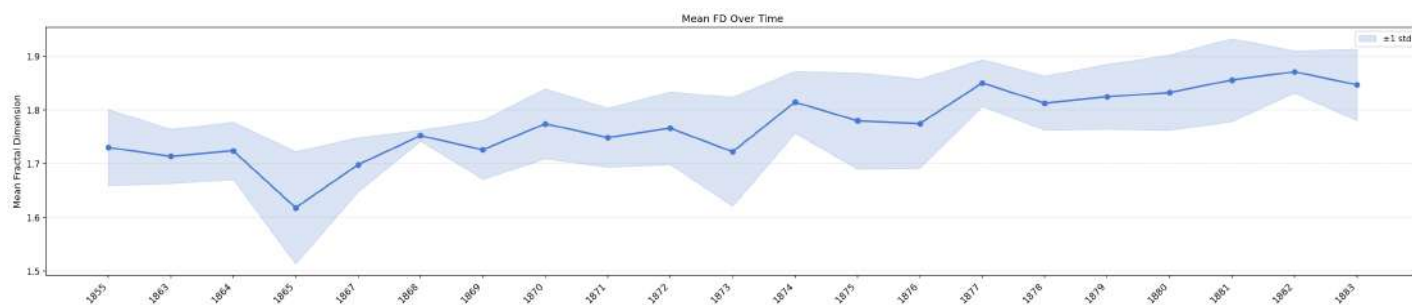


Figura 24. Gráfico de tendência de Camille Pissarro. Fonte: Autor

5.2.5. Gráfico Geral

Nesta seção, apresentam-se gráficos unificados que englobam os resultados mencionados de Claude Monet, Camille Pissarro, Van Gogh e Louis Wain. O gráfico evidenciado na

Figura 25 é uma versão condensada dos gráficos de tendência mencionados nas seções de resultado de cada artista. Nessa representação, a evolução da dimensão fractal média das obras ao longo dos anos é representada por 4 linhas sombreadas em cores distintas, uma para cada artista. Devido à falta de datação de obras de Louis Wain, foi necessário adicionar os dois períodos de análise do pintor (antes de 1925 e após 1925) como novos elementos distintos no eixo X. Mesmo que algumas obras possam ter sido produzidas em anos já evidenciados no eixo, incorporá-las aos anos já listados seria inseguro.

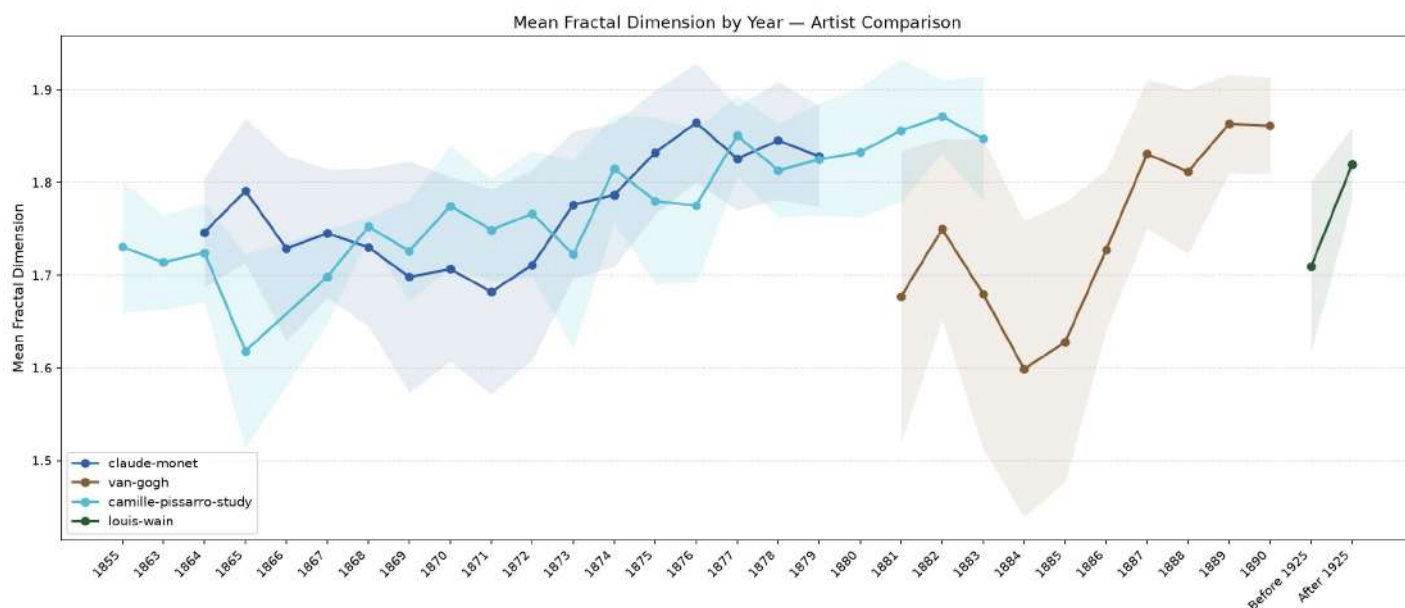


Figura 25. Gráfico de tendência dos 4 artistas analisados. Fonte: Autor

No gráfico da Figura 26, evidencia-se a dispersão dos valores de dimensão fractal das obras dos 4 artistas por meio de *boxplots*. Cada caixa representa o intervalo interquartil (25° a 75° percentil) das dimensões calculadas para as pinturas daquele ano, com a linha preta central indicando a mediana e as hastes mostrando a extensão dos valores restantes. Neste gráfico, também devido ao problema mencionado no parágrafo passado, foi necessário adaptar o gráfico e adicionar os dois períodos de análise de Louis Wain.

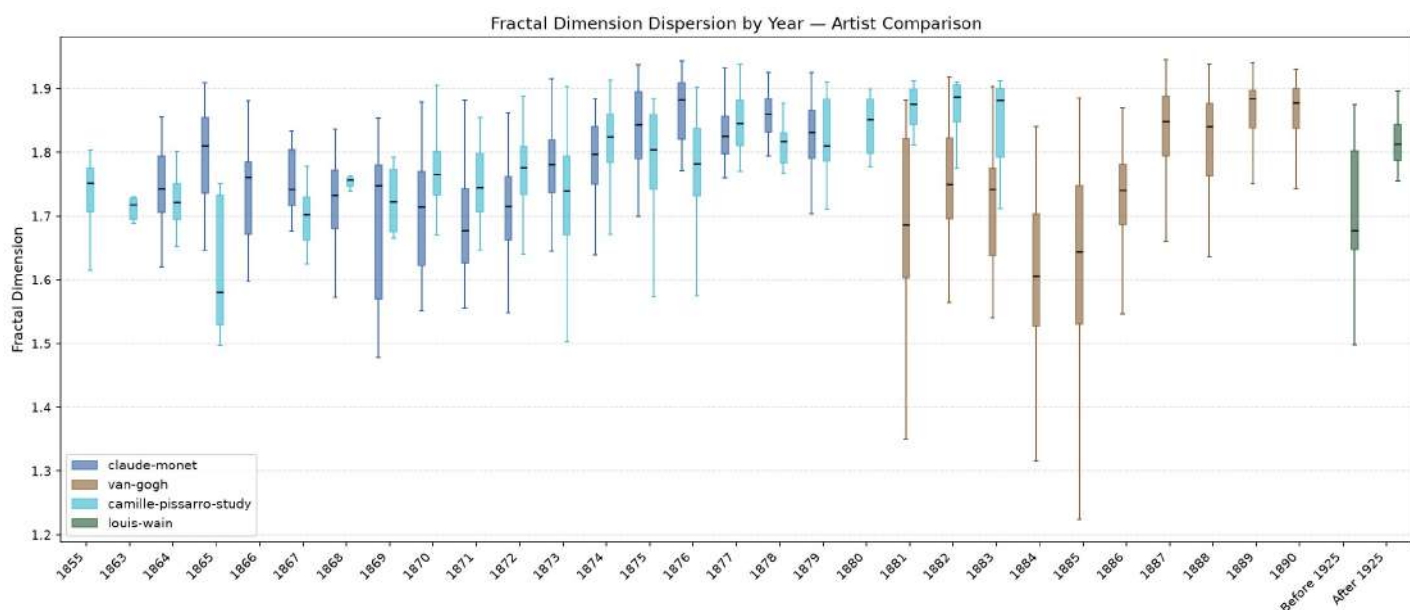


Figura 26. Gráfico de dispersão dos 4 artistas analisados. Fonte: Autor

6. Discussões e Trabalhos Futuros

Durante a realização desta pesquisa, enfrentou-se algumas dificuldades e fatores limitantes. Dentre eles, é possível definir como principal dificuldade a falta de acesso a grandes quantidades de pinturas em alta qualidade de resolução, devidamente categorizadas por data de produção. Em trabalhos relacionados, os autores tiveram acesso direto a curadores de museus e instituições especializadas, o que lhes permitiu reunir acervos extensos, com datação precisa e imagens de alta resolução, possibilitando uma estimativa de dimensão fractal com maior precisão. Neste trabalho, por outro lado, a coleta de imagens dependeu de fontes públicas disponíveis on-line, o que impôs limitações consideráveis tanto na quantidade quanto na qualidade das imagens obtidas. Essa restrição reflete-se diretamente tanto no tamanho quanto na qualidade dos conjuntos analisados. Por exemplo, enquanto foi possível reunir 782 pinturas de Van Gogh e 409 de Claude Monet distribuídas ao longo de suas respectivas décadas de produção, o acervo de Louis Wain, disponível publicamente, somou apenas 41 pinturas, número consideravelmente menor e, além disso, sem datação precisa para a maior parte das obras. Soma-se a isso o fato de que, aproximadamente, metade das imagens utilizadas possuem resolução inferior a 1024 pixels, o que limita o potencial de análise da complexidade dos traços da imagem de forma independente do conteúdo artístico da imagem.

Outro ponto limitador é que este trabalho não realizou nenhum tipo de categorização clínica associado aos valores de dimensão fractal obtidos. Os resultados apresentados restringem-se à comparação estatística entre grupos (esquizofrenia e controle) e à observação de tendências ao longo do tempo, sem estabelecer faixas de valores associadas a sintomas do transtorno. Por exemplo, definir que pinturas com dimensão fractal entre 1.2 e 1.5 não estariam associadas a quadros esquizofrênicos, enquanto valores acima de 1.7 evidenciariam possíveis indícios de traços esquizofrênicos. Tal categorização exigiria uma etapa adicional de validação, correlacionando os valores de dimensão fractal com diagnósticos clínicos formais e escalas de severidade estabelecidas,

algo fora do escopo deste trabalho, mas essencial para que a métrica tenha valor clínico direto. Ainda assim, a determinação de faixas de referência, como passo de trabalhos futuros, poderia oferecer grande utilidade através da disponibilização de uma classificação interpretável, em conjunto com o valor da dimensão fractal.

Apesar dos obstáculos, uma possível aplicação das produções deste trabalho é a utilização da funcionalidade desenvolvida em ateliês terapêuticos destinados a pacientes com transtornos mentais, como os promovidos pelo Museu de Imagens do Inconsciente. Ao longo de décadas, o museu reuniu um extenso acervo de pinturas, desenhos e esculturas produzidos por pacientes durante atividades de expressão artística, constituindo uma importante fonte de pesquisa sobre a relação entre manifestações artísticas e processos psíquicos. Nesse contexto, o algoritmo desenvolvido poderia ser empregado para calcular a dimensão fractal dessas produções, permitindo a realização de análises quantitativas em larga escala e contribuindo para investigações sobre possíveis alterações estruturais nas obras ao longo do acompanhamento clínico.

Além da possível aplicação em ateliês terapêuticos, a já mencionada integração do algoritmo de estimativa da dimensão fractal à plataforma ZophIA constitui outro benefício direto dos resultados obtidos neste trabalho. Ao ser disponibilizada como um *endpoint* da API do sistema, a funcionalidade desenvolvida passa a operar em conjunto com os indicadores quantitativos já extraídos a partir de gravações de voz, oferecendo a pesquisadores e profissionais da psiquiatria uma medida objetiva adicional, derivada da produção artística visual de um mesmo paciente. Essa integração representa um passo relevante em direção à consolidação de uma abordagem computacional e quantitativa para o acompanhamento de transtornos neurológicos, permitindo relacionar diferentes modalidades de dados, como voz e imagem, em busca de correlações ainda pouco exploradas na literatura.

Referências

- Arsie, Karla C. e Ribeiro, A. A. (2009). Dimensão espacial. *Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná*.
- Assis, T. A. d., Miranda, J. G. V., Mota, F. d. B., Andrade, R. F. S., and Castilho, C. M. C. d. C. (2008). Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 30(2):2304.
- Blumer, D. (2002). The illness of vincent van gogh. *American Journal of Psychiatry*, 159(4):519–526.
- Ciornai, S. (2004). *Percursos em Arteterapia: Arteterapia Gestáltica, Arte em Psicoterapia, Supervisão em Arteterapia*. Summus Editorial, São Paulo.
- Cui, T. and Wang, T. (2024). Exact box-counting and temporal sampling algorithms for fractal dimension estimation with applications to animal behavior analysis. *Results in Engineering*.
- de Carvalho, Danilo Andrade Nazeozeno e de Araújo, M. G. (2022). A névoa de monet. *Revista Multidisciplinar em Saúde*.
- Forsythe, A., Williams, T., and Reilly, R. G. (2017). What paint can tell us: A fractal analysis of neurological changes in seven artists. *Neuropsychology*, 31(1):1–10.
- Hans, P. (1922). *Bildnerei der geisteskranken*. Springer.
- Henemann, G. M., Brachmann, A., and Redies, C. (2017). Statistical image properties in works from the prinzhorn collection of artists with schizophrenia. *Frontiers in Psychiatry*, 8:273.
- Hoptman, M. J. (2015). Impulsivity and aggression in schizophrenia: A neural circuitry perspective with implications for treatment. *CNS Spectrums*, 20(3):280–286.
- Mandelbrot, B. B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Company, San Francisco.
- Marinotti, C. S. (2012). Campo e cidade: um estudo das relações texto-imagem em cesário verde e em camille pissarro.
- McGennis, A. (1999). Louis wain: His life, his art and his mental illness. *Irish Journal of Psychological Medicine*, 16(1):27–28.
- Peitgen, H.-O., Jürgens, H., and Saupe, D. (2004). *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*. Springer, New York, 2 edition.
- Perusso, L. D. C. (2022). Fractais: uma ponte entre a matemática e medicina.
- Pull, C. B. (1999). *Diagnosis of Schizophrenia: A Review*, chapter 1, pages 1–74. John Wiley Sons, Ltd.
- Regina, C. B. d. S. (2006). Esquizofrenia: uma revisão. *Psicologia Usp*, 17:263–285.
- Sigaki, H. Y. D., Perc, M., and Ribeiro, H. V. (2018). History of art paintings through the lens of entropy and complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(37):E8585–E8594.