



FRAGMENTAÇÃO DA MANCHA URBANA DO MUNICÍPIO DE CAMPINAS – SP ENTRE 1989 E 2021: UMA ANÁLISE POR MEIO DA DIMENSÃO FRACTAL

Tatiane Duarte Silva Oliveira¹
Marcos César Ferreira²

RESUMO

A dimensão fractal (DF) revela padrões de estruturas e formas em diferentes escalas, pois expõe a sinuosidade dos limites do crescimento, além da forma, apresentando até mesmo grau de densidade e características dessa flexuosidade. Ao representar as formas, a DF pode mostrar uma permanência consistente de compactidade ou um espaço fragmentado de um aglomerado ou mancha urbana. O objetivo deste artigo é investigar o crescimento da mancha urbana de Campinas – SP entre 1989 e 2021, através de cálculos da estimativa de DF baseados nos métodos *box-counting* (contagem de caixas) e relação perímetro-área. Os resultados obtidos a partir do método *box-counting* mostraram que em 1989 a mancha urbana de Campinas apresentava DF=1,4890; em 2021 este valor aumentou para DF=1,5230. A dimensão fractal estimada pelo método perímetro-área apresentou o menor valor em 1989 (DF=1,6784) e maior valor em 2021 (DF=1,8832). Com base nestes resultados, concluiu-se que tem ocorrido o aumento na fragmentação da borda e na área de vazios urbanos no município de Campinas neste período de 32 anos.

Palavras-chave: Fragmentação Urbana, Espalhamento Urbano, Dimensão Fractal, Município de Campinas.

ABSTRACT

The fractal dimension (DF) shows patterns of structures and shapes at different scales, identifying the sinuosity of the urban sprawling limits and the density of urban built areas. DF can show the stability of compactness or the urban agglomeration fragmentation through the time. The aim of this paper is to investigate the growth of the urban area of Campinas – SP between 1989 and 2021, using the DF estimate by box-counting and perimeter-area relationship methods. The DF estimated by the box-counting method showed that in 1989 the urban area of Campinas showed DF=1.4890; in 2021 this value increased to DF=1.5230. The fractal dimension estimated by the perimeter-area method presented the lowest value in 1989 (DF=1.6784) and the highest value in 2021 (DF=1.8832). Based on these results, we concluded that there has been an increase in the fragmentation of the urban edge and empty spaces in the municipality of Campinas over this 32-year period.

Keywords: Urban sprawling, Urban fragmentation, Fractal Dimension, Campinas Municipality

¹ Doutoranda em Geografia na Unicamp, tatianedsoli@gmail.com;

² Professor Associado III do Instituto de Geociências da UNICAMP, macferre@unicamp.br;

INTRODUÇÃO

A fragmentação urbana é um processo relacionado à formação das cidades na era do pós-modernismo, e de acordo com Domingues (1994) é o quando o compacto é estilhaçado em vários conjuntos distintos, formando territorialidades complexas, descontínuas e sócio espacialmente enclavadas.

A partir destes pressupostos consideramos neste trabalho que a fragmentação é o espalhamento urbano (*urban sprawl*) que deixa marcas espaciais por meio de formas urbanas, principalmente, do centro em direção às bordas da cidade. Os autores Torres e Alberti (2000) e Galster *et al.* (2001) entendem o espalhamento urbano como a transformação da antiga estrutura compacta monocêntrica em uma policentricidade dispersa.

A fragmentação do aglomerado urbano é cenário de diversos problemas que afetam o cotidiano dos seus moradores, pelo fato de os aglomerados urbanos reunirem centros de comércio e serviços, cujos trabalhadores residem em bairros muito distantes destes locais e de acesso de itens básicos para qualidade de vida – saúde, cultura, lazer e educação. (FRANZ *et al.*, 2006; SARZYNSKI *et al.*, 2005; EWING, 2008; KORSU; NECHET, 2017; SIHUI *et al.*, 2021).

De acordo com Russonello e Stewart (2004 *apud* Ewing e Hamidi, 2015), em 2004 a *Smart Growth America* e a *National Association of Realtors* entrevistaram consumidores do ramo imobiliário, em relação às suas preferências na escolha de uma comunidade para morar. Os resultados mostraram que 55% dos entrevistados priorizaram o curto tempo de deslocamento (menos de 45 minutos) entre a residência e o trabalho, comércio e escolas como critério de decisão.

Segundo Bartholomew e Ewing (2011), cidadãos interessados em adquirir imóveis optam por residências mais próximas de estações de transporte público, centros comerciais e parques e espaços abertos. De acordo com Ewing e Hamidi (2015) esses critérios influenciam o aumento do preço do metro quadrado para venda e aluguel de imóveis, e dessa forma, boa parte dos consumidores são obrigados a optarem por residências localizadas às margens da cidade, mesmo com tempo maior de deslocamento da casa para trabalho.

Os autores Huang *et al.* (2019) e Libertun de Duren (2018) afirmam que muitos problemas, tais como, redução da qualidade de vida, desemprego e insegurança que atingem esses moradores, são causados pelo tempo longo de deslocamento de um bairro para os centros, através do transporte público. E a maior parte dos moradores dos fragmentos são de famílias de

baixa renda que buscam comprar ou alugar residências em locais distantes das regiões centrais, devido ao seu baixo custo.

Além disso, segundo Andreaseny e Møller-Jensen (2017), o poder de compra de veículos particulares é restrito, e, desta forma, esta população é dependente do transporte público.

De acordo com Khavarian-Garmsir, Sharif e Sadeghi (2023), recentemente tem se discutido uma nova abordagem para planejamento urbano, sendo a *15-minute city* que visa o acesso rápido, fácil e adequado de todos os moradores da cidade a centros de saúde, segurança, prestação de serviços públicos, mercearias, supermercados, escolas, parques, praças, instalações esportivas, culturais e recreativas e locais de trabalho em apenas 15 minutos seja a pé, de bicicleta, transporte público ou particular. E isso seria possível a partir de uma cidade planejada como uma colcha de retalhos de muitos aglomerados. E esses núcleos “costurados” com mercearias, farmácias, unidades de atendimento à saúde, unidades de segurança e lazer localizados e com uma rede de acessos muito próximos e capazes de oferecer uma dinâmica de deslocamento que ocorre em 15 minutos.

Ainda segundo Khavarian-Garmsir, Sharif e Sadeghi (2023) definindo-se como uma mudança de estrutura de forma urbana monocêntrica para policêntrica, sob a perspectiva fundamental do crono-urbanismo, sendo o tempo é uma medida para entender o espaço, a desigualdade social e nível de qualidade de vida.

A dimensão fractal (DF) tem uma boa contribuição para análises de crescimento urbano, expansão urbana, de investigação de dinâmica e estimativas de crescimento e morfologia urbana, pois expõe a sinuosidade dos limites do crescimento, pressupondo elementos além da forma, apresentando até mesmo grau de densidade e características dessa flexuosidade. Ao representar as formas, pode mostrar uma permanência consistente de compacidade ou um espaço fragmentado de um aglomerado ou mancha urbana.

Neste sentido, a DF apresenta bons resultados na investigação de crescimento urbano, expansão urbana, estimativas de crescimento e morfologia urbana em regiões metropolitanas. Isto porque, ela revela padrões de estruturas, compacidade, níveis de fragmentação e formações em diferentes escalas. O fato de se poder estudar um fenômeno em diferentes escalas, também oferece a possibilidade de identificar limiares críticos na organização espacial (PUREVTSEREN *et al.*, 2018; MENZORI, 2021).

Levando-se em conta essa premissa, o objetivo geral deste trabalho é investigar o crescimento do aglomerado urbano de Campinas – SP entre 1989 e 2021, através da dimensão



fractal estimada a partir do método *box-counting* e pela relação perímetro-área, e a formação de espaços enclavados e fragmentados ao longo de mais de três décadas.

Com objetivos específicos, este artigo busca identificar as direções do crescimento do aglomerado para delimitar as áreas do aglomerado com tendências comuns de expansão e ocupação nas unidades regionais administrativas já existentes em Campinas e caracterizar seu crescimento urbano através da estimativa da dimensão fractal radial, definida com base na lei de atenuação da distância, centro-borda urbana. Os resultados calculados a partir do método *box-counting* mostraram que em 1989 a mancha urbana de Campinas apresentava DF de 1,4890 e em 2021 o valor aumentou para 1,5230. E a DF pela relação perímetro-área apresentou o menor valor no ano de 1989, (1,6784) e 1,8832 no ano de 2021. Esses valores indicam que tem ocorrido o aumento na fragmentação da borda e dos vazios urbanos no município neste período de 32 anos.

REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com Bassolas *et al.*, (2019), o contínuo e acelerado aumento da população urbana, juntamente à concentração centralizada de atividades para o acesso à saúde, educação, saneamento básico e cultura, impulsionam a mudança da configuração monocêntrica das cidades para uma configuração policêntrica. Segundo estes autores, a policentricidade caracteriza o espaço numa fragmentação constituída por centros de atividades distintos, enquanto a expansão urbana mostra a sua dispersão espacial. A fragmentação urbana está relacionada

“[...] aos atributos de forma e estrutura de um conjunto de núcleos urbanizados, entendendo-a como um processo de construção da forma urbana, que transforma uma estrutura compacta e monocêntrica em uma estrutura descontínua e policêntrica, formada por um conjunto de núcleos urbanos dispersos.”. (COELHO, 2015, p. 18).

De acordo com Venter *et al.* (2021) o desenvolvimento urbano em um contexto de espalhamento resulta em desigualdade, segregação e discriminação, pois favorece determinadas classes e contribui para a falta de investimentos em infraestrutura em comunidades localizadas nas bordas das cidades. A urbanização é o acúmulo do cotidiano da cidade, dos seus fenômenos, da sua história, dos seus fatos e acontecimentos, das suas pessoas, mercados, mercadorias, processos, redes, fluxos e entender esse emaranhado que vem de inúmeras direções, pode até mesmo adequar as diversas escalas geográficas e de análise da cidade. (NASCIMENTO; VILLELA, 2017).

Segundo Andreasen, e Møller-Jensen (2017), unidades de trabalho com vagas de emprego estão concentradas nas regiões centrais, e um dos critérios de seleção para contrato é

a proximidade da moradia ao local de trabalho, devido aos atrasos que o longo tempo de deslocamento de um transporte público ou congestionamentos podem causar.

A qualidade de vida é prejudicada quando o tempo de lazer, vivência e cultura são limitados para dar lugar ao tempo para deslocamento para trabalho (ida e volta), em razão que os trabalhadores que usam transporte público necessitam sair mais cedo de casa para conseguir chegar há tempo do início do expediente. Geralmente, os pontos de embarque são distantes das residências que moram, ou seja, deve somar a esse tempo, o período necessário para o deslocamento de casa até o local de embarque e o tempo de permanência em um transporte público, o que são fatos muito cansativos. (LIBERTUN DE DUREN, 2018; HUANG *et al.*, 2019).

Além do mais, esses trabalhadores não podem usar o intervalo de almoço para descansar, almoçar com a família e resolver questões pessoais em suas residências, devido à distância que estão de suas casas e precisam permanecer no local de trabalho (que muitas vezes não oferece local de descanso durante o intervalo e não disponibilizam a refeição, o que significa que há um custo de tempo e dinheiro para trabalhar). São moradores que saem do trabalho às 17 horas, mas, devido ao tempo de deslocamento, chegam em casa muito tarde da noite. (KORSU; NECHET, 2017; LIBERTUN DE DUREN, 2018; HUANG *et al.*, 2019).

E a segurança, principalmente de mulheres, é comprometida, quando precisam transitar longas distâncias do local do embarque e desembarque do transporte público. (LIBERTUN DE DUREN, 2018).

São estes alguns dos problemas gerados pela fragmentação urbana, e que afetam diretamente a qualidade de vida de uma população, e conseqüentemente, atinge questões sociais, financeiras e políticas de uma cidade. (FRANZ *et al.*, 2006; HORNER; MEFFORD, 2007; LIBERTÚN DE DURÉN, 2018. ANDREASENÝ; MØLLER-JENSEN, 2017; EWING, 2018; VENTER *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2022).

Santos (1987) afirma que o cidadão deveria ter a mobilidade espacial e o acesso a serviços públicos, questionando assim a fixação da pobreza em determinados espaços. Ao mesmo tempo, segundo Veras (1999, p. 33), “defende o direito de o cidadão permanecer no lugar que se identificava, criticando, assim, a descaracterização de bairros, a expulsão de favelados, sem direito às raízes.”. Santos defende que o cidadão deveria ter acesso à vida digna no seu lugar de origem, ou em qualquer outro lugar de moradia, seja no centro, ou nas margens.

Os fragmentos de um aglomerado urbano podem ser vistos como diversas partes de um tecido urbano que faz parte de um contexto de acesso, rapidez e facilidade para qualidade de vida dos seus habitantes?



O que é um problema real e cotidiano dos moradores, pode começar fazer parte de um planejamento que não visa o início e a desconstrução do espaço, mas, a modelagem a partir do que já existe?

Para avaliações do espaço para fins de planejamento da expansão urbana, crescimento urbano, ordenamento territorial e organização do espaço, são necessárias metodologias e técnicas que calculam a precisão e expõem a sinuosidade dos limites do crescimento urbano, pressupondo elementos, além da forma, mostrando o grau de densidade e as características dessa sinuosidade. (FIDELIS-MEDEIROS; GRIGIO, 2019).

Para possível planejamento da expansão urbana adequada e análise precisa de crescimento urbano espacial, ordenamento territorial e organização do espaço (que podem promover a redução dos problemas ocasionados pela fragmentação espacial urbana) são necessárias metodologias e técnicas que calculam a precisão e expõem a sinuosidade dos limites do crescimento urbano, pressupondo elementos, além da forma, mostrando o grau de densidade e as características dessa sinuosidade. (FIDELIS-MEDEIROS; GRIGIO, 2019).

A forma urbana é mais que simples formato da mancha de áreas construídas. Ela pode ser identificada, caracterizada e medida pela DF, que permite descrever os níveis espaciais de complexidade e fragmentação da área e do perímetro das manchas urbanas. A geometria euclidiana se propõe a estudar formas regulares, que quase sempre são produzidas pelo homem; já a geometria fractal é capaz de estudar padrões regulares e organizados, dentro de uma aparente irregularidade, frequentemente encontradas na natureza. (FUZZO; REZENDE; SANTOS, 2009).

O trabalho pioneiro sobre dimensão fractal e estrutura espacial foi apresentado por Mandelbrot em 1967 e desde então a geometria fractal tem sido amplamente utilizada na geografia urbana. Logo após essa publicação houve trabalhos inovadores mais descritivos relacionados ao fractal urbano.

O pesquisador Mandelbrot (1983) propôs o conceito de fractal em termos do comprimento do litoral e calculou a dimensão fractal de uma série de litorais regionais a Grã-Bretanha. Batty e Longley (1986) usaram a dimensão fractal para avaliar a irregularidade e formas do uso da terra da cidade de Swindon no Reino Unido.



Frankhauser (1988) apresentou os resultados do cálculo fractal dos padrões de uso do solo urbano. Calculando a dimensão fractal de 20 cidades nos Estados Unidos, Shen (2022) descobriu que DF poderia ser usada como um índice para medir o crescimento espacial urbano.

O termo dimensão fractal foi criado em 1975 por Benoît Mandelbrot, em um estudo da geometria dos objetos, que se mede detalhes e irregularidades das formas, que a geometria clássica euclidiana não é capaz de medir. A geometria euclidiana se propõe a estudar formas regulares que quase sempre são feitas pelo homem, já a geometria fractal estuda padrões regulares e organizados dentro de uma aparente irregularidade, muito encontradas na natureza. (FUZZO; REZENDE; SANTOS, 2009).

Um aspecto muito interessante da DF, é o conceito de autossimilaridade, que corresponde à relação de semelhança que uma parte do objeto tem com o todo, a estrutura fractal se repete em escalas diferentes. Os fractais têm uma dimensão não-integral pois ocupam mais espaço do que uma simples linha – a primeira dimensão – mas não ocupam todo o plano – a segunda dimensão. O nível de fragmentação é representado por valores fracionários como, por exemplo, 1.6 e 2.1, algo diferente dos valores inteiros encontrados para as dimensões euclidianas. Assim, entre as dimensões 1 e 2, assim como entre as dimensões 2 e 3, haveria dimensões “quebradas” ou “incompletas”, tais como linhas não retilíneas, polígonos não convexos, abertos, massas incompletas etc. (JOYE, 2011; KRAFTA; SILVA, 2020; BATTY; LONGLEY, 1994; FRANKHAUSER, 1994).

Nesse contexto, Mandelbrot (1983) nos lembra de que “nuvens não são esferas, montanhas não são triângulos, árvores não são lisas, nem os raios viajam em uma linha reta”.

Essa definição pode ser aplicada nos trabalhos de identificação de métricas das áreas urbanas e de conhecimento da dinâmica e transformação de uma cidade, visto que o perímetro urbano e limites dessas áreas são generalizados, tendo seus contornos que são muitas vezes distorcidos e sinuosos, sintetizados e os tamanhos reais sendo reduzidos de acordo com o tamanho da escala utilizada.

A possibilidade de medida de objetos de acordo com sua verdadeira forma, amplia as técnicas de análise precisas e multiescalares de variadas áreas de estudo. A fragmentação, a heterogeneidade, a não continuidade, não similaridade que são identificados pelo fractal são relevantes para as pesquisas de medicina da saúde, ecologia, biologia, geomorfologia, meio ambiente, agricultura, energia elétrica, pedologia, arquitetura e áreas urbanas. (MANDELBROT, 1983).



Assim, a DF revela padrões de estruturas e formações em diferentes escalas. As regiões metropolitanas se interligam física, política, cultural e economicamente e assim, apresentam diferentes formas de crescimento se misturam em maior ou menor grau. A metodologia não precisa se limitar a análise de uma unidade (cidade), mas em várias em um mesmo contexto metodológico (BATTY; LONGLEY, 1994; FRANKHAUSER, 1998, 2004; THOMAS *et al.*, 2008; PUMAIN; TANNIER, 2005; SALINGAROS, 2003).

A DF torna-se uma ferramenta muito útil para a apreensão das características individuais de uma forma, para perceber a expansão de novas áreas urbanas a partir de uma área inicial. As áreas iniciais podem ser qualquer ponto de uma cidade, não é necessário ser o ponto mais denso, sendo essa escolha baseada na heterogeneidade da própria dinâmica de crescimento esparsa e difusa, para planejamento de futuras ocupações urbanas.

METODOLOGIA

A análise do crescimento do aglomerado urbano de Campinas – SP no período de 1989 a 2021 foi realizada através de cálculos da estimativa de dimensão fractal baseados nos métodos *box-counting* (contagem de caixas) e na relação perímetro-área.

Primeiramente, foi necessária a digitalização da mancha urbana nos anos de 1989, 1994, 1999, 2004, 2009, 2014 e 2021 em tela, utilizando-se o método de interpretação visual (vetorização de imagens) em ambiente SIG.

A estimativa da DF a partir da relação perímetro-área (DPA) representa a medida de quanto a linha do contorno urbano afasta-se de uma linha reta indicando a sinuosidade do perímetro urbano e o quanto sua respectiva área de ocupação é fragmentada. (FERREIRA, 2014). Para isso foram calculados o tamanho da área em km² e do perímetro em km das manchas urbanas e aplicadas na seguinte form. (1):

$$D = 2. \frac{\ln(0,25p)}{\ln A} \quad (1)$$

A estimativa da DF por método de contagem de caixas (DCC) calcula a DF a partir da relação entre o número de células ou *pixels* (caixas) necessários para preencher uma área ou objeto n (r) e o respectivo tamanho da área ou objeto r (tamanho da célula ou *pixel*) em cada resolução espacial).

Para isso as manchas urbanas vetorizadas foram convertidas para o formato *raster*, de acordo com a resolução espacial das imagens usadas para delimitação do contorno da mancha urbana. Para as imagens *LANDSAT* de 30 metros foram: 30 m, 60 m, 120 m, 240 m, 480 m, 960 m, 1920 m e 3840 m.

E para a imagem CBRS 4 A foram: 2 m, 4 m, 8 m, 16 m, 32 m, 64 m, 128 m e 256 m.

Em seguida identificada a quantificação dos pixels. E aplicadas na seguinte form. (2)

$$D = \frac{\log N}{\log(1/r)} \quad (2)$$

Materiais

A imagem de satélite mais antiga de Campinas é de 1989, e por isso o mapeamento se deu a partir desta data, e assim foi realizado levantamento de imagens orbitais com intervalo de cinco anos que compreenderam os anos de 1989, 1994, 1999, 2004, 2009, 2014 e 2021 e realizada a digitalização das manchas urbanas em ambiente SIG. Todas as imagens orbitais foram adquiridas gratuitamente no banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (<https://www.gov.br/inpe/pt-br>), já ortorretificadas e tratadas radiometricamente e geometricamente. Quadro 01.

Quadro 1 - Banco de dados de sensoriamento remoto

Produto	Fonte	SRC	Dados	Data	Escala/Resolução
Imagens de Satélite	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)	SIRGAS 2000 UTM 23 S	Sensor TM <i>Landsat 5</i> Sensor CBRS 4A	1989	30 metros
				1994	
				1999	
				2004	
				2009	
				2014	
				2021	

Fonte: INPE (2023)

Interpretação visual de imagens orbitais

O processo de interpretação visual foi baseado de acordo com o conceito de mancha urbana do IBGE (2009) que define como “área densamente habitada cuja proximidade das edificações não permite a sua representação individualizada e sim, o contorno da área do conjunto das edificações.”. São áreas ocupadas de forma contígua por residências, comércio, ruas pavimentadas ou não pavimentadas e adjacentes as regiões homogêneas que apresentam características de uso excessivo do solo e visível desgaste acentuado da área.

Mapeamento das manchas urbanas

Para a vetorização das manchas urbanas em tela no SIG QGIS 3.18 (QGIS Development Team, 2022) nos anos de 1989 a 2021 foi considerado a resolução radiométrica para interpretação visual. Foram utilizadas as bandas 3 da imagem *Landsat 5* e CBRS 4 com resolução radiométrica de 8 bits.



Crescimento direcional

O crescimento direcional foi mapeado por meio da sobreposição das manchas urbanas mapeadas em 1989 e 2021, mapa de unidades regionais administrativas (distritos) de Campinas, com a finalidade de conhecer as regiões do município que apresentaram maiores tendências à compactação e fragmentação.

Para mapear a DF do crescimento direcional foram produzidas, inicialmente, áreas concêntricas posicionadas no centro urbano de Campinas, com área inicial de 2.500 m². Essa medida foi definida de acordo com o tamanho de área urbanizada consolidada em 1991. (SILVA; MATIAS, 2017). Essas áreas concêntricas foram produzidas pelo algoritmo buffer, disponível no SIG QGIS 3.28.3, segundo a metodologia utilizada por Marques (2005) e sobrepostas no arquivo vetorial de distritos.

Dimensão fractal radial

Para analisar o crescimento da mancha urbana em relação ao centro às margens da cidade (bordas), foi utilizada a metodologia de Gong. *et. al* (2020), baseada nos raios dos círculos concêntricos. De acordo com Gong. *et. al* (2020) valores de DF maiores que 2,0 mostram que a densidade da área urbanizada aumenta do centro para a borda; DF = 2 significa que a densidade da área urbanizada não se alterou; e D menor que 2,0 indica que a densidade dos espaços urbanos diminui do centro para a borda.

Foi considerado nesse cálculo que a dimensão do raio é a DF, baseado na lei da atenuação da distância. Considerou – se o raio dos círculos concêntricos como as áreas das manchas urbanas $N(r)$, temos a seguinte form. (3):

$$\text{Log}N = N_0 + D \quad (3)$$

Onde N_0 representa um coeficiente constante e D é a DF que representa a taxa relativa de decaimento da densidade de área urbanizada do centro para a borda.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Crescimento da mancha urbana de Campinas – SP entre 1989 e 2021, através da dimensão fractal baseada no método contagem de caixas (box-counting).

Os resultados mostraram que em 1989 a mancha urbana de Campinas apresentava DF de 1,4890 e em 2021 o valor aumentou para 1,5230. A dinâmica do crescimento do aglomerado urbano estimado pelo método *box-counting* apresenta crescimento contínuo até 1999, e quedas até 2009, um processo com variadas oscilações. O valor da DF voltou aumentar em 2014, sendo



que apresenta resultado acentuado e significativo no ano de 2021, o qual é o maior valor estimado através deste método. Tabela 1.

Os valores próximos a 1,0 significam áreas mais compactas, e contornos da mancha retilinizados. Valores que se aproximam a 2,0, ou são maiores que 2,0 apresentam maior sinuosidade do limite da mancha urbana e acentuado nível de fragmentação. Baseado na estimativa pelo método de contagem de caixas, os valores de DF situaram-se entre 1,4000 e 1,5300, sendo que de 1994 a 2014 os valores de DF se mantiveram entre 1,5050 e 1,5060. Tabela 1.

Tabela 1 – Valores da dimensão fractal da expansão urbana no município de Campinas entre 1989 e 2021, estimados pelo método *box-counting*

Ano	DF	Dinâmica de crescimento
1989	1,4890	-
1994	1,5051	+0,0161
1999	1,5064	+0,0013
2004	1,5025	-0,0039
2009	1,5020	-0,0005
2014	1,5062	+0,0042
2021	1,5230	+0,0168

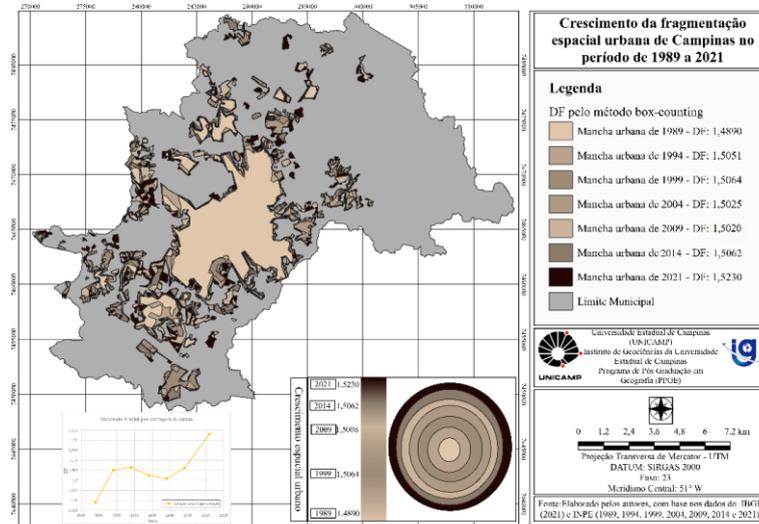
Fonte: Elaborada pelos autores

Na Figura 1 é apresentado o mapeamento das manchas urbanas e os valores da DF, e é possível verificar baixa correlação desses valores com a dinâmica espacial de crescimento das manchas ao longo do tempo, pois, constata-se que as estimativas apresentaram pouca variação no período estudado. Diferentemente da espacialização das manchas que, através de uma interpretação visual, observa-se que conforme o avanço temporal analisado, apresentou evolução no processo de espalhamento do tecido urbano e mudança no contorno das formas urbanas do centro de Campinas ao longo do tempo, e isso pode ser constatado na Figura 2.

Na Figura 2 são apresentadas as formas urbanas do centro de Campinas entre 1989 e 2021. Observa-se que em 1989 as curvas apresentavam formato mais retilíneos, aumentando a sinuosidade até 2014. Ao relacionar com os valores de DF, percebe-se que há queda dos valores entre os anos de 2004 e 2009, o que não corresponde a representação espacial da Figura 2. Percebe-se que esse aumento da tortuosidade ao longo desse período se verifica em aumento das ramificações da área central, as quais aumentam o tamanho de sua área. Em 2021, quando há aumento do valor do fractal, constata-se suave aumento de ramificações, e intensificado aumento da área existente. Isso mostra que os resultados da DF pela contagem de caixas, estimou que houve aumento da fragmentação urbana, mas de forma contida e desacelerada, mas diferente do que pode ser analisado no mapa da espacialização das manchas.

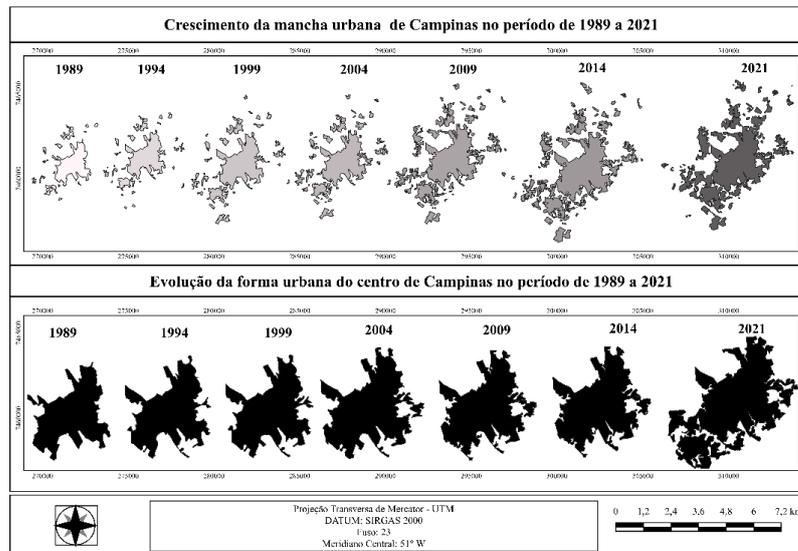


Figura 1 – Espacialização da fragmentação urbana através da DF (box-counting)



Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 2 – Mapeamento do crescimento das manchas urbanas e evolução da forma urbana do centro de Campinas no período de 1989 a 2021.



Fonte: Elaborada pelos autores

Crescimento da mancha urbana de Campinas – SP entre 1989 e 2021, através da dimensão fractal pela relação perímetro-área

Os resultados da DF estimados pelo método da relação perímetro – área mostraram uma dinâmica constante de aumento da fragmentação da mancha urbana de Campinas ao longo do período analisado, apresentando uma queda apenas em 2021, mas ainda assim com valor alto, próximo a 2,0. O menor valor de DF estimado através deste método foi para o ano de 1989,



(1,6784) e o maior valor é de 1,9228, para 2014. Estes dados mostram um crescimento contínuo entre >1,6000 e >1,9000.

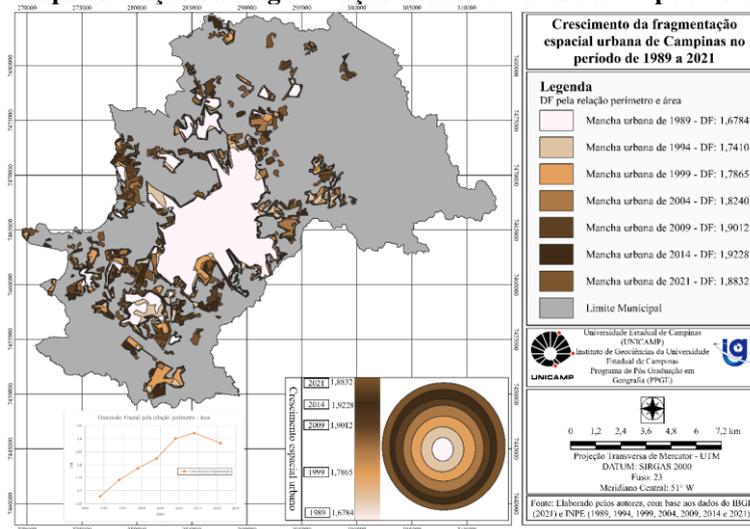
São valores bastantes acentuados, principalmente entre 2004 e 2021, os quais são próximos a 2,0, o que pode significar maior sinuosidade dos limites das manchas urbanas relacionada aos níveis de fragmentação espacial. (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores de DF calculados pelo método da relação perímetro área para as manchas urbanas de Campinas entre 1878 e 2022

Ano	Área (km ²)	Perímetro (km)	DF		
1989	93,92	181	1,6784	-	
1994	112,948	245	1,7410	+0,0626	
1999	130,402	310	1,7865	+0,0455	
2004	148,251	382	1,8240	+0,0375	
2009	228,978	667	1,9012	+0,0772	
2014	174,527	541	1,9228	+0,0216	
2021	190,388	621	1,8832	-0,0396	

Fonte: Elaborada pelos autores

Figura 3 – Espacialização da fragmentação urbana através da DF pela relação perímetro - área



Fonte: Elaborada pelos autores

A Figura 3 mostra esta relação da fragmentação espacial com os valores da DF obtida por meio da relação perímetro-área, pois o mapeamento apresentou maior compactação no ano de 1989 e limites retilíneos comparados aos contornos das manchas urbanas dos anos posteriores. Novas fragmentações vão surgindo ao longo do tempo, em conformidade com os valores da DF que vai aumentando. Neste método os valores dos fractais têm fortemente uma relação com a espacialização do crescimento da fragmentação urbana de Campinas.



Os valores da DF obtidos pela relação perímetro-área tem forte relação com os formatos das manchas urbanas apresentados na Figura 2, pois, verifica-se que conforme apresenta-se um aumento da sinuosidade dos limites das manchas e aumento da fragmentação, evolui o valor da dimensão fractal, sendo que em 2021 quando não existe mudança significativa do formato, a DF fractal reduz

Neste estudo foram utilizadas manchas urbanas de Campinas entre os anos de 1989 a 2021, em aplicações de dois diferentes métodos de estimativa de valores de fractais, sendo que no método *box-counting* foram usadas como variáveis valores de pixels e de resoluções espaciais, e no método relação perímetro – área, foram utilizadas os totais das áreas e dos perímetros das manchas urbanas. Os dois métodos apresentaram resultados bem distintos, apesar do uso da mesma base cartográfica de uma mesma área de estudo, com a mesma escala. Verificou-se que os valores de DF calculados pelo método da relação perímetro-área puderam representar melhor os níveis de fragmentação e sinuosidade das manchas urbanas, já que apresentaram maiores ou iguais a 2,0. A maior fragmentação espacial está associada a valores de DF mais próximos de 2; dessa forma, pode-se afirmar que o método pela relação perímetro - área pode representar melhor os aspectos relacionados ao formato da mancha urbana e ao espalhamento do crescimento desta mancha.

Identificação direções do crescimento do aglomerado com tendências comuns de expansão e ocupação nas unidades regionais administrativas já existentes em Campinas e caracterização do crescimento urbano através da estimativa da dimensão fractal radial

Estes resultados estão relacionados ao processo histórico de expansão de Campinas – SP. As áreas com maior preenchimento estão associadas com maiores investimentos em infraestrutura, comércio, habitação na área central desde o início da urbanização de Campinas no século XVIII e verticalização nesta mesma região iniciada em 1935. (FERREIRA, 2007).

Em 1970 empreendimentos imobiliários de empresas e as construções de habitações da Companhia de Habitação Popular (COHAB), Campinas potencializou a expansão periférica. Nos anos 1980 e 1990 surgem os condomínios residenciais fechados e o crescimento urbano intensifica-se em direção à periferia. (SILVA, 2008).

De acordo com Célia e Neto (2003, p.26), na década de 1980, ao mesmo tempo que pode considerar Campinas como um polo econômico dinâmico e promissor, por outro lado, deve considerar que “nem todo o espaço urbano e as condições de vida da população são atingidos por este desenvolvimento produzindo uma heterogeneidade dos espaços ocupados.”.



Visto que, de acordo com Célia e Neto (2003), nas décadas de 1970 e 1980 foram inseridas novas importantes rodovias no município, sendo: Rodovia dos Bandeirantes (SP-348), Rodovia Dom Pedro I (SP-065) e Rodovia Santos Dumont (SP-075) e isso pode ter influenciado na inserção de novos loteamentos as bordas da cidade e de condomínios fechados com casas de alto padrão às margens da cidade, sendo essa expansão registrada neste mesmo período.

Às margens da rodovia Anhanguera (Sul e Oeste) são implantados conjuntos habitacionais, favelas e bairros mais pobres; na faixa ao longo da rodovia Dom Pedro I surgem condomínios residenciais de classes médias e alta, em direção ao Norte e Leste. (CAIADO; PIRES 2006; SILVA, 2008; KUBOTA, 2012; LEONELLI; CAMPOS, 2018).

Em razão que nesse período houve também a construção do Shopping Iguatemi (próximo à rodovia Dom Pedro I) que atraiu o investimento na construção de condomínios (com casas de alto padrão) voltados para moradores de frequentariam essa opção de lazer, que tem custos de consumo acima da renda da maioria da população. (CAIADO; PIRES, 2002).

Neste intervalo de tempo foi verificado um novo fenômeno, sendo o abandono da área central pelos grupos que possuem renda mais elevada. À medida que eram construídos novos conjuntos habitacionais direcionados para o atendimento dessa demanda mais afortunada financeiramente, era consolidada a cultura de que nos lugares distantes do centro, eram mais seguros (uma cultura baseada de que distantes da maioria da população, constituída por trabalhadores e com baixa renda, sofreriam menos com a insegurança pública) e qualidade de vida, devido à proximidade de vegetação mais densa e melhor infraestrutura. (CAIADO; PIRES, 2002).

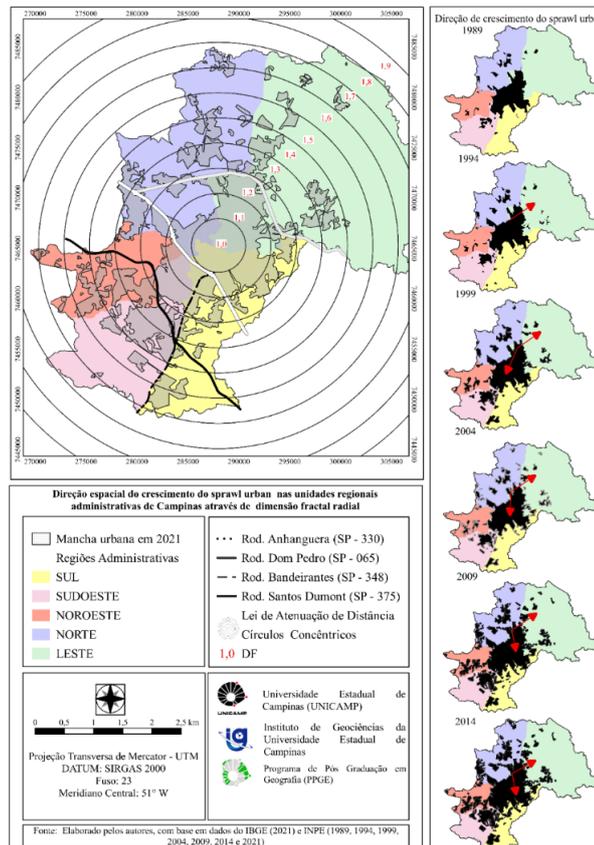
Na Figura 4 é possível verificar essa relação das instalações dos novos condomínios, loteamentos, rodovias e shopping center entre os anos de 1970 e 1990, pois, próximas as rodovias Dom Pedro I e dos Bandeirantes é notável os fragmentos urbanos nos dois anos.

No ano de 1989 ao longo da rodovia Dom Pedro I é bastante intensificada a sinuosidade da mancha urbana e a faixa da dimensão fractal é de 1,2. Em 2021 ao longo da rodovia dos Bandeirantes destaca – se um aumento da mancha urbana, e ao mesmo tempo, de fragmentos do espaço urbano, o que corrobora com as ocorrências históricas em relação a esse fenômeno.

A dimensão do raio confirma essas mudanças, pois a compacidade verificada desde 1989 vai se atenuando até apresentar, em 2021, uma redução do crescimento compacto das áreas urbanizadas em direção às bordas. Essa dimensão do raio pode ser observada no avanço dos fragmentos ao longo dos círculos concêntricos que apresentam diferentes faixas da DF. (Figura 4).

Observa-se que no círculo concêntrico com $DF=1,0$ encontra-se a área mais compacta e com maior densidade de ocupação urbana. À medida que a DF aumenta ao longo dos círculos concêntricos, aumenta sinuosidade das bordas e o nível de fragmentação do espaço urbano e isso para os dois períodos

Figura 4 - Direção espacial do crescimento *sprawl urban* nas unidades regionais administrativas a partir de DF radial

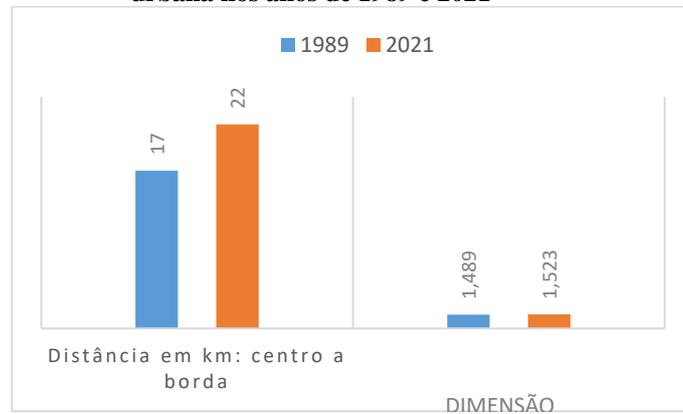


Fonte: Elaborada pelos autores

A dimensão do raio resultou, para 1989, em um valor de 2,0798, e, para 2021, o valor de 2,033. De acordo com Gong. et. al (2020), valores maiores que 2,0 significam uma redução da área urbanizada ocupada. Isso quer dizer que há um aumento da fragmentação da área urbanizada.

Evidentemente, com o passar dos anos há o crescimento da mancha urbana; no entanto, esse crescimento apresenta rupturas, que na cidade, são os vazios urbanos. O gráfico da Figura 5 mostra a relação do crescimento urbano do centro às bordas da cidade.

Figura 5 – Campinas (SP): Variação espacial da DF e da distância entre o centro e a borda da área urbana nos anos de 1989 e 2021



Fonte: Elaborada pelos autores

Em 1989, ao mesmo tempo que Campinas apresentou pelo método *box-counting* DF 1,4890 e pela relação área-perímetro valor de 1,6784, demonstrando a tendência de sinuosidade da borda, ela apresentou um crescimento urbano de 17 km do centro urbano ao fragmento mais distante, localizado na borda. Em 2021 a cidade mostrou um crescimento mais acentuado em relação a distância do centro a borda (22 km), com DF de 1,5230 (*box-counting*) e 1,8832 (perímetro-área). Isso denota que o crescimento foi de fato expressivo e em relação às margens, pois os fractais apresentam as rupturas e não homogeneidade do espaço urbano. Dessa forma, é possível afirmar que à medida que a DF aumenta, apresentam na cidade de Campinas áreas mais esparsas, e que os locais com menor DF apresentaram maior adensamento e preenchimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando-se a expansão do aglomerado urbano de Campinas e do seu crescimento direcional a partir da dimensão fractal, produzido neste estudo, constatamos que Campinas pode ser considerada na atualidade uma cidade policêntrica. O espalhamento urbano espacial é influenciado pelo uso do solo e pela baixa densidade residencial às margens da cidade, devido ao predomínio deste espalhamento ao longo de rodovias, e com vazios urbanos. O mapeamento da dimensão fractal realizado neste estudo constatou que a fragmentação ocorreu às margens das rodovias Dom Pedro I e dos Bandeirantes, e onde tem surgido vazios urbanos. A dimensão fractal radial confirma essas mudanças, pois, a compactação verificada já desde 1989 vai se atenuando, até apresentar, em 2021, redução do crescimento compacto das áreas urbanizadas em direção às bordas. A dimensão fractal do raio urbano atingiu valores superiores a 2,0, o que indica a redução na área urbanizada ocupada.

Os resultados deste estudo mostraram crescimento fragmentado, com compactação no centro, e que foi reduzindo-se ao longo do tempo e do espaço em direção à periferia. O uso do método da dimensão fractal permitiu identificar informações geométricas mais detalhadas, tais como o nível de rupturas e os novos fragmentos urbanos implantados no aglomerado urbano de Campinas no período de tempo analisado. Esta abordagem pode contribuir para novas propostas de planejamento urbano, como é o caso da *15-minute cit*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREASENY, M. H.; MØLLER-JENSEN, L. Access to the city: Mobility patterns, transport and accessibility in peripheral settlements of Dar es Salaam. **Journal of Transport Geography**, [S.l.], v. 10, n.62, p. 2029. 2017.
- BARTHOLOMEW, K.; EWING, R. Hedonic Price Effects of Pedestrian-and Transit-oriented Development. **Journal of Planning Literature**, [S.l.], v. 26, n.1, p. 18–34. 2011.
- BASSOLAS, A.; BARBOSA-FILHO, H.; DICKINSON, B.; DOTIWALLA, X.; *et. al.* Hierarchical organization of urban mobility and its connection with city livability. **Nature Communications**, [S.l.], v. 10. 2019.
- BATTY, M.; LONGLEY, P. **Fractal cities: a geometry of form and function**. San Diego: Academic Press, 1994.
- DOMINGUES, A. (Sub)úrbios e (sub)urbanos – o mal estar da periferia ou a mistificação dos conceitos?. **Revista da Faculdade de Letras – Geografia I Série**, v. 10/11, p. 5-18. 1994.
- EWING, R.H.; HAMIDI, S. Compactness versus Sprawl: A Review of Recent Evidence from the United States. **Journal of Planning Literature**, v. 30, n. 4, p. 413-432. 2015.
- EWING, R.; TIAN, G.; LYONS, T. Does compact development increase or reduce traffic congestion?. **Cities**, [S.l.], v.72, p. 94-101. 2018.
- FERREIRA, M.C. **Iniciação À Análise Geoespacial: Teoria, Técnicas E Exemplos Para Geoprocessamento**. Rio Claro: UNESP, 2014. 343p.
- FIDELIS-MEDEIROS, F.; GRIGIO, ALFREDO-MARCELO. Identificação das Unidades Homogêneas e Padrão da Ocupação Urbana (UHCT) como subsídio ao ordenamento territorial em Mossoró, RN – Brasil. **EURE**, [S. l.], v. 45, n. 135, p. 245-270. 2019.
- FRANZ, G.; MAIER, G.; SCHRÖCK, P. Urban Sprawl. How Useful Is This Concept?. **EconPapers Economics at your fingertips**, [S.l.], p. 2-30. 2006.
- FRANKHAUSER, P. Comparing the morphology of urban patterns in Europe a fractal approach in Borsdorf, A. e Zembri, P. Report COST Action 10 **Urban Civil Engineering**, Bruxelas, p. 79-105. 2004.
- FRANKHAUSER, P. The fractal approach. A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations. Special Issue on Population, **New Methodological Approaches in the Social Sciences**, [S. l.], v 10, p. 205-40. 1998.



FRANKHAUSER, P. **La fractalité des structures urbaines**. Paris: Anthropos, 1994.

FUZZO, R. A.; REZENDE, V.; SANTOS, T. S. Fractais: algumas características e propriedades. Encontro de produção Científica e Tecnológica, 4, 20 a 23 de outubro de 2009. **Anais [...]**. Faculdade Estadual de Ciências e Letras de Campo Mourão/Núcleo de Pesquisa Multidisciplinar, Campo Mourão-PR, 2009.

GALSTER, J.; HANSON, R.; RATCLIFFE, M.R.; WOLMAN, H.; FREIHAGE, S.C.J. Wrestling Sprawl to the Ground: Defining and Measuring an Elusive Concept. **Housing Policy Debate**, [S.l.], v.12, n.4, p. 681-717. 2001.

GONG, Y.; LI, X.; CONG, X; LIU, HE. Research on the Complexity of Forms and Structures of Urban Green Spaces Based on Fractal Models. **Hindawi**, Londres, v.1, p. 1 – 11. 2020.

HORNER, M.W.; MEFFORD, J.N. **Investigating urban spatial mismatch using job housing indicators to model homework separation**. [S.l.]: Environment and Planning, v. 39, p. 1420-1440. 2007.

HUANG, J.; LEVINSON, D.; WANG, J.; HAITAOM J. Job-worker spatial dynamics in Beijing: Insights from Smart Card Data. **Cities**, [S.l.], v.86, p. 83-93. 2019.

KAHN, M.E. The Quality of Life in Sprawled versus Compact Cities. In Transport, **Urban Form and Economic Growth**, [S.l.]: OECD Publishing. 2007.

KHAVARIAN-GARMSIR, A.R.; SHARIFI, A.; SADEGHI, A. The 15-minute city: Urban planning and design efforts toward creating sustainable neighborhoods. **Cities**, [S.l.], v.132, p. 01-05. 2023.

KORSU, E.; NECHET, F.L. Would fewer people drive to work in a city without excess commuting? Explorations in the Paris metropolitan área. **Transportation Research Part A: Paris**, p. 259–274, 2017.

LIBERTUN DE DUREN, N.R. The social housing burden: comparing households at the periphery and the centre of cities in Brazil, Colombia, and Mexico. **International Journal of Housing Policy**, [S.l.], v.18, n. 02, p. 177-203. 2018.

JOYE Y. A review of the presence and use of fractal geometry in architectural design. **Environment and Planning B**, Londres, v. 38, p. 814-828. 2011.

KRAFTA, R.; SILVA, E. L. Detecção de padrões da forma urbana: Quadro Geral e um Caso. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Paraná, v.12. 2020.

MANDELBROT, Benoit. **The Fractal Geometry of Nature**. New York: W.H Freeman, 1983.

MARQUES, M. L. **Metodologias para a estimativa da dimensão fractal do crescimento de aglomerados urbanos: uma contribuição ao estudo da expansão urbana da região metropolitana de São Paulo entre 1905 e 2001**. 2005. 226 f. Tese (Doutorado em Geografia) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.



MENZORI, I.D. **Dinâmicas territoriais e métricas espaciais: avaliação de expansão urbana em cidade de porte médio.** Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – São Carlos: UFSC, 2021.

NASCIMENTO, E.; VILLELA, A. L. V. **Chapecó em foco: textos e contextos sobre o espaço urbano regional.** São Carlos: Pedro & João Editores, 2017. 597p.

PUREVTSEREN, M. TSEGMID, B. INDRA, M. et.al. The Fractal Geometry of Urban Land Use: The Case of Ulaanbaatar City, Mongolia. **LAND MDPI**, [S. l.], v. 07, n.67, p. 02-14. 2018.

RUSSONELLO, B.; STEWART, B. **National Survey on Communities.** Washington, DC: National Association of Realtors and Smart Growth America. 2004.

SALINGAROS, N. A. The sensory value of ornament. **Communication & Cognition**, [S. l.], v. 36, p. 331-351. 2003.

SANTOS, M. **O espaço do cidadão.** São Paulo: Nobel, 1987.

SARZYNSKI, A.; WOLMAN, H.L.; GALSTER, G.; HANSON, G. Testing the Conventional Wisdom about Land Use and Traffic Congestion: The More We Sprawl, the Less We Move?. **Gwipp Working Paper Series**, Washington, 2005.

SHEN, L.; PENG, Y.; ZHANG, X.; WU, Y. An alternative model for evaluating sustainable urbanization. **Cities**, [S. l.], v. 29, p. 32 – 39. 2012.

SIHUI, G.; TAO, P.; SHUYUN, X.; SONG, C.; Chen, J. Fractal dimension of job-housing flows: A comparison between Beijing and Shenzhen. **Cities**, v. 112, p. 103-120. 2021.

SILVA, C.R.V.; MATIAS, L.F. Vetores de expansão urbana: análise da cidade de Campinas (SP). In: Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP. 25, 2017, Campinas. **Anais...** Campinas: Unicamp.

TANNIER, C; PUMAIN, D. Fractals in Urban Geography: a Theoretical Outline and na Empirical Example. European Journal of Geography. **Cybergeo, Systemes, Modelisation, Geoestatiques**, [S.l.], p. 307. 2005.

TORRES, P.M. ALBERT, M. Measuring Sprawl. Working Paper. **Centre for Advanced Spatial Analysis**, London, v. 27, 2000.

THOMAS, I.; FRANKHAUSER, P.; BIERNACKI, C. The morphology of built-up land scapes in Wallonia (Belgium): a classification using fractal indices. **Landsc Urban Plan**, [S. l.], v.84, n. 2, p. 99–115, 2008.

VENTER, C.; MAHENDRA, A.; LIONJANGA, N. In Chapter 15 - Urban expansion and mobility on the periphery in the global South. **Urban Form and Accessibility: Social, Economic, and Environment Impacts**, Washington, v.1, n.1, 2021.