

# APLICAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL PARA O ESTUDO DA MORFOLOGIA URBANA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

*Mara Lúcia MARQUES*  
*Marcos César FERREIRA*

## **Introdução**

O estudo multitemporal da morfologia do perímetro urbano e do seu preenchimento permite identificar como os fatores físicos e antrópicos intervêm no desenvolvimento das cidades e influenciam a estruturação do espaço urbano. A análise morfológica da cidade permite estabelecer relações entre a forma do perímetro urbano, o uso da terra, a densidade de ocupação, a distribuição das estruturas e os processos socioeconômicos.

Para viabilizar uma descrição mais adequada destas manifestações em termos cartográficos, pode-se utilizar como paradigma os fractais, o qual tem sido considerado como abordagem eficaz na interpretação e representação dos aspectos físicos e morfológicos de objetos geográficos no contexto espaço-temporal. A morfologia urbana pode apresentar um comportamento fractal, ou até multifractal, e suas estruturas espaciais apresentam propriedades cuja dimensões variam de acordo com a dinâmica de expansão. A dimensão fractal representa um modelo para a compreensão do preenchimento do espaço urbano e do seu espalhamento. Os métodos empregados nesta estimativa são fundamentados em conceitos de tamanho e resolução, os quais se aplicam ao estudo do preenchimento de espaços e análise de formas, modelando de maneira dinâmica ou estática, estes fenômenos da geometria urbana.

A análise da morfologia urbana e de suas relações com o processo de distribuição das estruturas espaciais, realizadas pela análise fractal, podem ser empregadas como subsídios ao planejamento urbano, propondo soluções para expansão mais homogênea do espaço. O desenvolvimento urbano homogêneo do aglomerado revela valores de dimensão fractal com baixa variabilidade ao longo do tempo e, por outro lado, a ocupação desordenada mostra valores discrepantes quando comparados em mapas de diferentes instantes de tempo.

O objetivo deste estudo é aplicar metodologias para estimativa de dimensão fractal, baseada nas técnicas de perímetro-área e perímetro-resolução, associados a métodos de contagem de células e de círculos concêntricos para a análise multitemporal da morfologia do aglomerado da região metropolitana de São Paulo no período 1905-2001. Os aspectos físicos do contorno urbano, quando analisado pela dimensão fractal, possibilita a caracterização da organização e regularidade da ocupação, a partir da análise da fragmentação dos limites das áreas construídas, o que em uma perspectiva histórica tende a fornecer indicativos da dinâmica interna do aglomerado no processo de metropolização.

## **Evolução da Forma Urbana de São Paulo**

No final do séc. XIX, a cidade de São Paulo apresentava propriedades geométricas bem definidas. Neste momento histórico, já era evidente a segregação espacial entre os bairros de elite e as áreas de periferia, revelando assim, uma geografia social da cidade, com os ricos concentrados no eixo sudoeste e os pobres distribuídos fora da área urbanizada. Em 1923, entrou em vigor a primeira lei de zoneamento, quando ocorreu a implantação da infra-estrutura e do saneamento em loteamentos destinados à classe alta e, as atividades poluentes (como indústrias), eram instaladas nas áreas periféricas, onde eram construídas as habitações econômicas. Na década de 30, ocorreu investimento público em infra-estrutura viária para atender o crescimento da indústria, ocorrendo também a introdução dos primeiros ônibus urbanos. O primeiro plano urbanístico de São Paulo foi elaborado por Prestes Maia, em 1930, quando no governo de José Pires do Rio, um plano de avenidas foi realizado para garantir maior espaço nas vias para ônibus e automóveis. Prestes Maia se tornou posteriormente prefeito e teve três mandatos, sendo dois no período de 1938 a 1945 e o terceiro de 1961 a 1965, foi o primeiro prefeito a considerar a cidade de um ponto de vista global e sistemático (SOUZA, 1999; PRATES, 2001).

Segundo Toledo (1996), o processo de urbanização da metrópole de São Paulo passou por quatro surtos urbanísticos, os quais podem ser identificados em períodos distintos e descritos a partir das mudanças que determinaram na estruturação urbana:

O primeiro surto ocorreu entre 1872-1899, no governo João Teodoro, o qual impulsionou a urbanização da cidade, incentivando fazendeiros e capitalistas constituírem domicílios temporários na cidade, pois estes se capitalizaram com a exploração da lavoura de café no oeste paulista. Em 1872, São Paulo se tornou importante entroncamento de estradas de ferro, beneficiando o comércio, atraindo o capital e favorecendo a instalação de indústrias. Neste período, também foram implantados a iluminação pública à gás, o tráfego de bondes à tração animal, rede de esgotos, ocorrendo por conseguinte, uma imigração volumosa à cidade. Na cidade foram construídos: as pontes Tamanduateí e Anhangabaú; a ampliação da Rua João Teodoro; a Ladeira General Carneiro ligação entre Rua Municipal com o Brás; o Aterro do Brás, facilitando o acesso a zona leste (saída para o Rio de Janeiro); a Rua Conde D'Eu (Rua Francisco Glicério) até a Rua Lavapés (caminho para o litoral) e a retificação do rio Tamanduateí. As ruas 25 de março, do Mercado, do Hospício (Rua Frederico Alvarenga) foram regularizadas no sopé do barranco do colégio e, em frente ao mercado, surgiu a Ilha Tamanduateí (Ilha dos Amores) e as ruas da área central da cidade foram arborizadas. Nas margens do rio Anhangabaú, as ruas do Seminário e Brigadeiro, à esquerda, e Florêncio de Abreu, à direita, iam se encontrar no campo da Luz, em frente ao Jardim Público. A estrada de ferro cortou as ruas e a ligação com o Jardim Público passou a ser por um único pontilhão, assim a cidade ficou dividida em duas: ao norte dos trilhos ficavam o Jardim Público, o Mosteiro da Luz (Bairro da Luz); ao sul ficavam a praça principal o Largo dos Curvos (Praça da República) e a rua do Arouche (rua Araújo) que ligava a Consolação ao Arouche. Foram construídos o aterro de Santana e a Ponte Grande sobre o Rio Tietê, possibilitando o acesso até a fazenda Santana e a saída para Bragança Paulista. Em 1878 e 1879 a partir de iniciativa privada foram construídos o Grande Hotel e o loteamento do Bairro Campos Elísios, desencadeando um processo de

urbanização marcado por loteamentos como: Higienópolis (entre 1890-1900); Chácara Martinho da Silva Prado, originando a Vila Penteado e Vila Maria (tubulações buscavam água nas nascentes do Pacaembu para abastecer a Vila Penteado); Chácara das Palmeiras, originando as ruas Baronesa de Itú, Barão de Tatuí, Conceição, Martim Francisco, São Vicente de Paula, Albuquerque Lins, Avenida Angélica e Alameda Barros; e a Chácara do Bexiga, originando em 1878 o bairro do Bexiga. O empreendedor Joaquim Eugênio de Lima foi responsável pela abertura das ruas José Getúlio e São Joaquim, no bairro da Liberdade e da Avenida Paulista, promovendo o arruamento e loteamento das quadras. Em 1888 foi aprovada a construção do Viaduto do Chá, ocasionando a demolição da casa do Barão de Tatuí para possibilitar a ligação do morro do Chá (cidade nova) com a rua Direita (centro velho).

No início do séc. XX, a expansão urbana era conduzida por interesses particulares da iniciativa privada, sendo que ao poder público ficava a implantação de infra-estruturas e serviços básicos. A lei nº 9 de 3/12/1892, determinou à Intendência de Obras a responsabilidade de aberturas de ruas e calçamentos, levantamento de planta cadastral, mapa da cidade para uniformização dos alinhamentos e edificações. E em 1896 foi criada a Comissão Técnica de Melhoramento da Cidade.

O segundo surto de urbanização ocorreu de 1900-1911 na administração de Antônio da Silva Prado, primeiro prefeito da capital paulista. As mudanças de maior importância neste período foram: a construção do Teatro Municipal; alinhamento das ruas 15 de Novembro, Álvares Penteado, Quintinho Bocafuva, da Fundação (Floriano Peixoto); Largo do Rosário (Praça Antônio Prado); canalização do riacho do Tamanduateí (1906) e obras de saneamento nas áreas de várzea; construção do viaduto Santa Efigênia; remodelação do Largo da Sé; melhorias na iluminação pública; e incentivo público para a construção de fábricas pelos fazendeiros de café.

O terceiro surto de urbanização ocorreu de 1911-1933, nas administrações de Barão Duprat (1911-1914), Washington Luís Pereira de Souza (1914-1919), Firmiano Moraes Pinto (1920-1926) e José Pires do Rio (1926-1930). Este período foi marcado pela mudança na fisionomia da cidade. Iniciou-se com a transformação na área central a partir da reurbanização do antigo Largo da Sé, no qual foram demolidos duas igrejas (Sé e São Pedro dos Clérigos) e os quarteirões que ligavam o Largo da Sé ao São Gonçalo (Praça João Mendes), desapareceram as ruas Esperança e Marechal Teodoro e a avenida São João passou a ser a radial de ligação do centro à zona oeste. Este período também foi marcado pela Primeira Guerra Mundial, pela crise econômica e a pela quebra da bolsa em 1929, mas em São Paulo o crescimento da indústria era contínuo e foram definidas áreas fabris e surgiram os bairros mistos industriais/residenciais. Os estabelecimentos fabris ocuparam as áreas de várzeas como a dos rios Tamanduateí e Tietê, por serem próximas as linhas férreas e de baixo valor. O surto industrial provocou um aumento populacional e uma gradual modificação na paisagem urbana, surgindo os seguintes bairros: Brás, Mooca, Belenzinho, Bexiga e Bela Vista, os quais se caracterizavam por construções térreas, casas sem jardim, geralmente geminadas e similares, sem estilo arquitetônico definido. Misturado a residências, existiam indústrias, algumas grandes, mas a maioria, pequena. Em 1916, foi criado na avenida Paulista o Parque Villon e a Esplanada do Trianon. Na

vertente sul da avenida se iniciou os bairros jardins como o Jardim América, Pacaembu, Alto da Lapa. Em 1921, a Companhia Cidade Jardim loteou terrenos na várzea do rio Pinheiros e surgiram os Jardim Leonor, Jardim Morumbi, como também o Jardim Europa criado pela Companhia City. Nos bairros jardins paulistanos, os espaços públicos e a vegetação eram valorizados, estimulando-se nas construções das residências, os terraços, balcões, janelas, como também, a sinuosidade das ruas e a disposição de jardins, que proporcionavam um inter relacionamento do espaço público com o privado. Durante o governo de José Pires do Rio, trechos do rio Tietê foram canalizados e o rio Pinheiros foi retificado. Em 1926, foram criados os parques da Água Funda e Ibirapuera, em 1929 o parque da Água Branca. A empresa Sarp Brasil S/A, em 1930 divulgou o Mapa topográfico do município de São Paulo produzido a partir de levantamento aerofotogramétrico, nas escalas 1:20.000 e 1:5.000. Neste mesmo ano foi publicado o Plano de Avenidas projetado por Francisco Prestes Maia. Em 1933, foi inaugurado o edifício do Mercado Municipal, com estrutura férrea importada da Alemanha.

O quarto surto de urbanização ocorreu entre 1934-1945 e teve início na administração Fábio Prado, prosseguindo no governo Prestes Maia. Foi um período de grandes intervenções, propondo uma reorganização sob critérios de coordenação de um perímetro de irradiação com um circuito de bulevares, com objetivo de desafogar e ampliar o centro comercial. Prestes Maia foi reeleito em 1961, permanecendo até 1965 e foi sucedido por Faria Lima, o qual deu seqüência as obras. Neste processo de reorganização da área central foram construídos o novo Viaduto do Chá, a avenida 9 de Julho, o túnel da avenida Paulista, a avenida Rebouças, as ruas Marconi e Martins Fontes e a estrada de Santo Amaro foi asfaltada (avenida Santo Amaro). Na criação do perímetro de irradiação, as ruas Líbero Badaró, Bejamim Constant e Boa Vista foram alargadas e foi construído o viaduto Boa Vista. Após a terceira e definitiva versão do Plano de Irradiação, foram implantadas as radiais para nordeste, sudoeste, sudeste, sul, noroeste e norte e as perimetrais: marginais Tietê e Pinheiros, a partir da canalização e retificação dos rios. No sistema radial-perimetral construíram arruamentos adaptados à topografia com diferenciação entre ruas principais (largas, retas e comerciais) e ruas secundárias (mais estreitas, residencial e com tráfego local).

O Plano de Avenidas e do Perímetro de Irradiação não foi todo concluído devido principalmente, às edificações já implantadas e o alto custos dos terrenos. As intervenções deste período provocaram um processo de descentralização com a dilatação e afastamento do comércio, das áreas industriais e das áreas residenciais, criando aglomerações externas à área central, assim as cidades da área metropolitana tiveram suas estruturas amplamente modificadas (TOLEDO, 1996). Na década de 60, o governo paulista iniciou a discussão sobre a concentração das atividades industriais, focalizando o aumento da degradação das condições de vida e do meio ambiente. No decorrer do tempo, se constatou que a metrópole paulista concentrava elementos poluentes no ar ocasionados pela associação da concentração destes com a densidade de área construída, que ainda favorece as inundações por ser excessivamente impermeabilizada. Os espaços residenciais segregados, como os loteamentos clandestinos da periferia e as favelas, são os mais atingidos pela poluição ambiental, onde ocorrem combinação de falta de arborização com a emis-

são de calor pelos materiais de construção e com a localização próxima a fonte de emissão de poluição (SOUZA, 1999; PRATES, 2001).

Para Macedo (2000), houve nas décadas de 80 e 90 um deslocamento das atividades econômicas do centro da cidade para as marginais ao longo do eixo sudoeste, devido a acessibilidade, ao menor custo da terra nas áreas periféricas ao CBD<sup>1</sup> e ao adensamento populacional, elevando a demanda de consumo nessas regiões. Esta tendência de ocupação influenciou o deslocamento da população de classe média e das classes mais baixas, as quais foram deslocadas para áreas distantes em direção a sul e a leste. As desigualdades sociais foram acentuadas pelas diferenças no uso e ocupação do solo, no transporte e nas questões ambientais. Em 1998, com a revisão da Lei de Proteção aos Mananciais, foram abordadas as questões sobre os assentamentos em áreas protegidas, mostrando a preocupação com a ocupação desordenada e seus impactos sobre o meio ambiente e criando expectativas positivas com relação a organização do processo de ocupação. Com a crescente industrialização, os problemas urbanos se tornaram complexos, como o crescimento horizontal desordenado, a incapacidade do estado em resolver os problemas de habitação para a população carente, favorecendo a expansão das periferias com a autoconstrução, sem infra-estrutura. Houve, também, a expansão vertical de áreas centrais, estimuladas pelas políticas financeiras do Banco Nacional da Habitação e investimento de dinheiro público em infra-estrutura urbana nos bairros de classes média e alta.

## **Análise Espacial Urbana pela Dimensão Fractal**

Algumas propriedades da geometria fractal são concordantes com a estrutura de aglomerações urbanas, mas mesmo assim, a utilização da análise da dimensão fractal exige avaliar se os conceitos aplicados são condizentes com cada realidade a ser representada. Pode-se constatar que cada construção ocupa uma certa superfície no solo e cada uma faz parte de um todo, sendo que a disposição da ocupação depende do critério dos cidadãos em se estabelecerem em determinada área. A partir da disposição das áreas construídas, ocorre o desenvolvimento das redes de circulação. Assim, pode se considerar que a interação entre a ação dos habitantes ao exercer certas atividades econômicas, as políticas públicas e a disposição da rede de transportes, contribuem para a configuração da geometria de uma malha urbana.

Na análise de áreas urbanas uma das primeiras aplicações possíveis da geometria é o estudo do uso e ocupação da terra. Esta análise pode abordar características bem diferentes, dependendo do nível de observação utilizado. A representação cartográfica ao nível regional, pode mostrar certas informações relacionadas à repartição espacial das aglomerações e sobre a forma de suas extensões. O nível local, por outro lado, retém detalhes características das habitações, das vias de circulação e das quadras. Considera-se o fractal uma forma de comparar estes diferentes níveis de observação, analisando-se elementos de uma estrutura com variações que exprimem desde noções de homogeneidade interna

---

<sup>1</sup> Central Business District (Distrito Central de Negócios).

até a repartição espacial das construções nas cidades (BATTY et al, 1989; FRANKHAUSER, 1994).

Na escala das regiões metropolitanas, a dimensão fractal está diretamente relacionada à morfologia das áreas construídas que pode ser estudada por meio da relação perímetro-área, que definem as formas das bordas das aglomerações. A dimensão fractal é importante para interpretação geométrica do crescimento urbano, a partir da organização hierárquica de diferentes usos da terra.

A aplicação da geometria fractal nas estruturas urbanas possibilita a descrição quantitativa de dois tipos de estruturas: (a) das estruturas ramificadas de aspectos lineares (limites das aglomerações; pesquisas de transporte) e (b) da estruturação da superfície (ocupação da terra; utilização da terra).

Nas áreas metropolitanas, o aspecto fractal do crescimento urbano está associado à repartição desigual das áreas construídas. Esta morfologia fragmentada das áreas metropolitanas não se explica pela intenção do planejamento urbano, mas deve ser interpretada como resultado de um processo de auto-organização espaço-tempo.

A observação de uma estrutura fractal de aglomerações urbanas indica que o crescimento urbano é influenciando e influencia a morfologia fractal. Os modelos de dimensão fractal baseados nos métodos radial, de quadrículas e de correlação podem explicar ou simular a evolução espacial das cidades, descrevendo o crescimento urbano como um crescimento fractal (FRANKHAUSER, 1994). O desafio é descobrir que fatores influenciam o processo de crescimento e no surgimento desta morfologia.

Nos estudos de desenvolvimento urbano de uma metrópole, pode-se realizar uma análise temporal da dimensão fractal e, se tentar estabelecer, uma relação entre a linha do tempo e o crescimento desta aglomeração, segundo períodos históricos e respectivos planos de urbanização. As propriedades de cada período, demonstra que a extensão espacial é um processo de crescimento que preserva os aspectos fragmentados da aglomeração durante longos períodos, as dimensões históricas do crescimento urbano, possibilitando estabelecer associações entre evolução espacial das cidades e a fragmentação das aglomerações. A extensão das cidades ao longo de novas vias de circulação e a interação entre o desenvolvimento dos meios de transporte e a evolução econômica e populacional, provocam um efeito de auto-organização que determinam as novas vias de circulação (BATTY; LONGLEY, 1994; FRANKHAUSER, 1994).

A análise do crescimento urbano mostra que esta evolução é dada pela expansão axial ou policêntrica. Estes efeitos aparecem independente de projetos de urbanização responsáveis por minimizar estes efeitos da auto-organização.

No crescimento radial, a extensão urbana acompanha as principais vias de transporte, férrea ou rodoviária. Esta rede demonstra um aspecto radial do fractal, que se manifesta pela diluição das áreas construídas a partir de um ponto central urbano. A forma do aglomerado urbano é estabelecida em planos circulares, embora em alguns casos, pode ocorrer o plano setorial. Este conceito representa o desenvolvimento axial das aglomerações, entretanto em certos períodos ocorre a desagregação das aglomerações e o declínio das vias centrais de circulação, sugerindo que a estrutura urbana não possui regularidade.

Quando as vias centrais são remanejadas com sucesso, persiste a morfologia axial. No crescimento policêntrico, os centros representam as funções de áreas centrais de uso interno se observando aí uma hierarquia no interior da área metropolitana, com uma certa autonomia na evolução espacial dos centros, reforçando a característica fragmentada da urbanização. (FRANKHAUSER, 1994).

A preservação dos espaços verdes é importante para a manutenção da estrutura fractal das aglomerações urbanas. Os espaços verdes não fazem parte de todos os planos de urbanização, mas a estrutura fragmentada urbana exige que exista uma hierarquia interna da organização espacial das áreas verdes. O aspecto fragmentado é o resultado da interação de dois sistemas diferentes: as vias de transportes e os espaços vazios. Os outros efeitos se referem à desagregação espacial das áreas urbanas decorrentes de fatores socioeconômicos.

Os estudos sobre a evolução da morfologia dos aglomerados urbanos, realizados após a Revolução Industrial, comparados aos respectivos planos urbanísticos, permitiram constatar que estes não influenciam diretamente o nível de desenvolvimento das áreas metropolitanas, sugerindo que existam processos de auto-organização que são responsáveis pelo crescimento axial ou policêntrico, além inclusive, de processos socioeconômicos relacionados ao surgimento de estruturas fragmentárias (BATTY et al, 1989; FRANKHAUSER, 1994).

O crescimento urbano ao longo da rede viária situada próxima à áreas comerciais e industriais, caracterizam aglomerações com perfil de centro econômico e administrativo. Nestes centros, a rede viária é centrípeta e se configura como uma estrutura radial e ramificada, desencadeando crescimento radial ao longo de vias de transportes mais importantes, atribuindo uma morfologia radial às aglomerações em formato de estrelas. A introdução do automóvel permitiu maior liberdade de circulação, possibilitando a urbanização de áreas mais afastadas, como as rurais. Conseqüentemente, o espaço urbanizado assumiu uma forma homogênea e compacta, provocando a interação entre a malha da rede de circulação e a repartição das habitações. Como a dimensão do fluxo de transporte depende do número de habitações e das funções administrativa e econômica de uma cidade, esta organização hierárquica influenciou a distribuição de fluxo nas redes formadas pelas cidades que compõem as áreas metropolitanas. O crescimento policêntrico está ligado a uma hierarquia de centros urbanos e influencia a morfologia das redes de transportes, fator importante para o crescimento axial e para o desenvolvimento espacial futuro da área urbana (BATTY ; LONGLEY, 1994; FRANKHAUSER, 1994).

A evolução demográfica e a interação socioeconômica entre os diferentes grupos de cidades analisadas por Frankhauser (1994) demonstraram como o processo de crescimento está estreitamente ligado à migrações internas da população. Este quadro resulta em diferentes tipos de utilização da terra, ocasionado pela distribuição desigual da população pela cidade. Quando um grupo populacional cresce, parte desta população busca nova residência e/ou nova profissão, ocorrendo a penetração em áreas limítrofes, gerando as invasões e sucessões.

A geometria fractal de uma aglomeração acompanha a evolução urbana e a variação histórica, e a evolução da dimensão fractal caracteriza a organização espacial da área urbanizada. Quando a dimensão fractal é constante durante um determinado período de tempo analisado, isto pode significar que a cidade cresce seguindo uma lei alométrica, ou seja, o crescimento é contínuo no espaço. Se a dimensão fractal aumenta, há indicação de uma evolução urbana com repartição mais homogênea da superfície construída. Quando a dimensão fractal diminui, pode se concluir que houve uma repartição da área construída de forma heterogênea, ocorrendo um crescimento desigual e espalhado das áreas construídas (BATTY; LONGLEY, 1994).

Uma vez que o tecido urbano sugere uma lei fractal devido seus aspectos irregulares, o princípio de ordem interna facilita a análise dos processos socioeconômicos suscetíveis de serem responsáveis pela decomposição das aglomerações. Para checar as características da evolução urbana que mostram um crescimento fractal das cidades, devem ser considerados três fatores: a importância das vias de circulação ou acesso, o crescimento policêntrico e a tendência de preservação de áreas centrais (FRANKHAUSER, 1994).

A fragmentação do espaço construído aparece como um fenômeno característico do crescimento urbano, tornando-se difícil traçar uma lógica interna devido à complexidade de sua estrutura. A relação entre o perímetro e a área de algumas metrópoles indica sempre a existência de um princípio de ordem interna de organização espacial das aglomerações, refletindo na morfologia irregular das bordas urbanas.

O estudo das principais características de novos tipos de objetos geométricos mostra que a fragmentação está estreitamente ligada à existência de uma organização espacial hierárquica. A distribuição fractal dos elementos ou objetos da superfície terrestre nunca é homogênea, mostrando uma série hierárquica de agregações que pode ser descrita por um método de mensuração denominada dimensão fractal. A dimensão fractal se caracteriza como um valor mediador da qualidade da rede: um valor baixo de dimensão indica uma forte característica hierárquica da rede e uma repartição não homogênea na superfície. Apesar destas redes obedecerem a lei fractal, isto não ocorre com a mesma evidência que as nas superfícies construídas.

A dimensão fractal pode servir para quantificar estruturas complexas como malhas urbanas e descobrir aspectos particulares não aparentes o que autoriza o uso dos fractais na análise da estrutura e da morfologia de regiões metropolitanas.

### *Métodos para estimativa da dimensão fractal de áreas urbanas*

A simulação da expansão urbana a partir de raios concêntricos e da contagem de células são procedimentos que permitem caracterizar esta dinâmica temporal e analisar a morfologia urbana a partir de sua evolução espacial (GOODCHILD, 1980; BATTY; LONGLEY, 1986, 1988 e 1994; LONGLEY; BATTY, 1989; FRANKHAUSER, 1994; LONGLEY; MESEV, 2001, apud DONNAY, 2001).

Em geometria fractal, a determinação da dimensão de um objeto pode ser obtida pelas seguintes relações:

$$N(r) = Kr^{-D} \quad (3.1)$$

e

$$L(r) = N(r)r = Kr^{(1-D)} \quad (3.2)$$

onde  $N(r)$  e  $L(r)$  são respectivamente a quantidade de partes que compõem o objeto e o comprimento do objeto, sendo  $K$  uma constante de proporcionalidade. Se temos uma série de observações de  $N(r)$  e  $L(r)$  em diferentes escalas  $r$ , pode-se derivar a dimensão fractal, transformando as equações 3.1 e 3.2 em logaritmos, realizando-se posteriormente a regressão linear entre estas variáveis.

Na determinação da dimensão fractal de um objeto por regressão linear entre a medida de comprimento do objeto e a resolução espacial, utiliza-se logaritmos naturais, tais como:

$$\log L(r) = \log K + (1 - D)\log r \quad (3.3)$$

onde  $(1-D)$  é a inclinação da reta de regressão.

Para se derivar a dimensão de um conjunto de objetos de diferentes tamanhos e medidos em uma mesma escala  $r$ , com razão escalar  $1/r$ , utiliza-se diretamente o tamanho de  $R$  (o tamanho do objeto). Desta forma, a equação pode então ser expressa da seguinte forma:

$$L(r) = K(R/r)^D r = KR^D r^{(1-D)} \quad (3.4)$$

Quando a escala é fixa,  $r$   $(1-D)$  é constante e, o tamanho do objeto ( $R$ ) variar, a transformação dos componentes da equação em logaritmos nos dá:

$$\log L_i = \log G + \frac{D}{2} \log A_i \quad (3.5)$$

Frankhauser (1992) calculou a medida para diferentes cidades do mundo, utilizando dois métodos: o dos raios concêntricos e o de contagem de células. A dimensão fractal das cidades evidencia partes ou fragmentos distribuídos em um plano, podendo ser calculada a partir de dois conjuntos de relações de escalonamento de fronteiras ou de limites determinados previamente. Qualquer escalonamento está baseado nas relações entre quatro parâmetros:  $N(r)$ ,  $L(r)$ ,  $A(r)$  e  $\rho(r)$ , sendo utilizado na forma de  $N(R)$  e  $\rho(R)$  e nas relações perímetro-área.

A mensuração da dimensão fractal do aglomerado urbano pode também ser obtida a partir da relação perímetro-área utilizando-se outros parâmetros.

Na geometria Euclidiana, a medida de tamanho em uma dada dimensão, é escalonada diretamente com uma medida em outra dimensão. Considerando a área  $A$  e o volume  $V$ , respectivamente, em duas e três dimensões, obtêm-se que a área tem tamanho calculado como o quadrado da medida da linha  $L$  ( $L^2$ ), enquanto o volume tem tamanho  $L^3$ . Se for requerido derivar área a partir do volume, esta pode ser dada como  $A \propto V^{2/3}$ . Mas, se for

requerido que linha  $L$ , ou perímetro, seja derivado a partir da área  $A$ , a relação passa a ser:

$$L \propto A^{1/2} \quad (3.6)$$

Toda relação semelhante com a equação acima, mostra que o tamanho em uma dimensão pode ser escalonado diretamente se conhecido a medida do objeto em uma dimensão superior ou inferior. Assim, se a área do círculo com raio  $r$  é  $\pi r^2$ , considera-se que  $L \propto r$  sofre variação de forma regular. Esta relação permite o estudo do crescimento relativo ou alométrico. Assim, tem-se uma condição de isometria quando a relação entre uma linha e uma área ocorre como visto na equação 3.6. Quando o valor de  $A$  for maior que  $\frac{1}{2}$ , tem-se alometria positiva e quando for menor, tem-se alometria negativa. Para derivar  $L$  a partir de  $A$ , a área está elevada a um parâmetro, o qual é maior que 1 e menor que 2:

$$L \propto (A^{1/2})^D = A^{D/2} \quad (3.7)$$

onde  $1 < D < 2$ .

Se  $D=2$ , então o perímetro seria escalonado para área, implicando que a área seria uma curva de espaço preenchido, e se  $D=1$ , o perímetro não seria escalonado mais que a unidade base de medida (a linha), o que implica na inexistência dos efeitos da resolução.

O coeficiente  $D$  é a dimensão fractal, que neste contexto representa uma medida empírica para estimar o quanto a curva em questão distancia-se de uma linha reta, indicando assim, o quão fragmentado ou tortuoso é o limite ao longo do espaço.

A medida do limite de objetos simples, é restrita à uma simples relação geométrica definida pela relação entre a resolução de unidade  $r$  e um perímetro  $L$ . A forma desta relação é dada na equação:

$$L(r) = N(r)r = \alpha r^{(1-D)} \quad (3.8)$$

onde  $N(r)$  é o número de segmentos na resolução  $r$ , que se aproximam do perímetro  $L(r)$ . Têm-se duas relações a partir do perímetro  $L(r)$ : uma em termos de área e outra em termos de resolução. Combinando estas duas, tem-se:

$$L(r) \propto A^{D/2} \propto r^{(1-D)} \quad (3.9)$$

A partir da equação 3.9 pode-se escrever a relação perímetro-área como:

$$\log L = \log \gamma + f(D) \log A \quad (3.10)$$

onde  $\log \gamma$  é o intercepto e  $f(D)=D/2$  é a inclinação da reta da regressão linear do  $\log$  do perímetro sobre o  $\log$  da área. A inclinação  $f(D)$  pode assumir diferentes formas funcionais a partir das quais,  $D$  pode ser sempre derivado por uma estimativa da inclinação.

A relação perímetro-resolução pode ser assim descrita:

$$\log L = \log \alpha + g(D) \log r \quad (3.11)$$

onde  $\alpha$  é o intercepto e  $g(D)=(1-D)$  é a inclinação da reta da regressão linear do  $\log$  do perímetro sobre o  $\log$  do comprimento de  $r$ .

## **Materiais e Métodos**

### *Base cartográfica*

Tomando-se como referência a evolução dos fatos históricos e sócio-políticos foi selecionado material cartográfico referente à distribuição espacial das áreas construídas na região metropolitana de São Paulo (RMSP), baseados em mapas de 1905, 1914, 1930, 1940, 1952, 1962 e 1972, na escala 1:250.000 (VILLAÇA, 1978), e mais recentemente, imagens TM e ETM<sup>+</sup> (LANDSAT) de 1996 e 2001.

### **Processamento digital de imagem**

Para a interpretação e análise das imagens digitais TM e ETM<sup>+</sup> (LANDSAT) foi necessário compreender o comportamento espectral dos objetos que compõe o aglomerado urbano. O tratamento digital das imagens que recobrem o aglomerado urbano da região metropolitana de São Paulo foi realizado a partir das seguintes ferramentas de processamento digital do sistema IDRISI 32:

- (a) o realce de borda, realizando a filtragem passa-alta para enfatizar as altas frequências espaciais e melhorar o contraste entre os objetos com características de ocupação urbana;
- (b) o realce linear, realizado a partir da análise do histograma das imagens e promovendo a expansão da distribuição da frequência na amplitude da variação dos níveis de cinza das imagens;
- (c) o realce de cor, que possibilitou composições em cores de conjuntos de três bandas, foram realizados alguns testes com diferentes composições colorida a partir da combinação de três bandas espectrais formando uma imagem. Após os testes, a imagem resultante da composição colorida associada ao espaço RGB (Red/Green/Blue) (as bandas 4 (R), banda 3 (G) e banda 2 (V)), sendo escolhida aquela que melhor identificou a separação entre os alvos urbanos e não-urbanos.

Foram utilizados para destacar a forma do aglomerado urbano recursos de interpretação visual, baseados em textura, padrão, forma, cor e localização. Assim, as imagens com composição colorida 4/3/2 foram exportadas para o AUTOCAD R14, onde foram utilizadas como base para a digitalização em tela.

### *Elaboração da base de dados espaciais*

- a) Digitalização dos mapas

Na elaboração da base de dados espaciais, inicialmente o material cartográfico composto de mapas no formato analógico foi convertido para o formato digital através de digitalização via tela. As imagens rasterizadas resultantes foram utilizadas com base para a

digitalização em tela, com o intuito de se gerar arquivos vetoriais. As informações do limite de áreas construídas e principais vias de acesso foram digitalizadas segundo rotina básica do software AUTOCAD R14, realizando digitalizações de forma convencional (modo ponto), tipo arco-nó-arco. O mesmo procedimento foi adotado para a conversão das imagens orbitais para o formato vetorial. Todos os planos de informação obtidos no AUTOCAD R14 foram exportados para o programa IDRISI32, onde foram estruturados no formato raster com resolução espacial de 30m. Assim, foi construída a base de dados formada por mapas digitais que identificam a forma das manchas ou aglomerados urbanos nas diferentes datas a partir do delineamento de adensamentos, de acordo com o método proposto por Batty et. al. (1993), no qual realiza-se a contagem de células em raios concêntricos através do posicionamento de uma grade sistemática sobre o aglomerado urbano e assim, fixando círculos com raios conhecidos a partir do centro do aglomerado (CBD).

#### b) Georreferenciamento

Na etapa de georreferenciamento, as imagens geradas tiveram suas coordenadas cartesianas convertidas para o sistema de coordenadas UTM (Projeção Universal Transversa de Mercator), cujos valores foram coletados na Carta Topográfica da Região Metropolitana da Grande São de Paulo, na escala 1:100.000 da EMPLASA, ano 1982. Este procedimento teve por finalidade a unificação da base cartográfica digital, gerando uma base de dados com mesma escala 1:100.000 e mesma resolução espacial. No georreferenciamento, foram criados arquivos vetoriais e rasterizados para cada mapa, segundo as datas 1905, 1914, 1930, 1940, 1952, 1962, 1972, 1996 e 2001, no sistema UTM, ajustados à carta topográfica em papel. Foram utilizados 08 pontos de controle para cada imagem, este número de pontos de controle foi limitado pela dificuldade de se encontrar pontos possíveis de serem identificados em toda a série histórica de mapas analógicos, por estes serem bastante generalizados. Utilizou-se como algoritmos de correção, o Linear e o Vizinho Mais Próximo. Com este procedimento foram obtidos mapas digitais que representam a evolução do aglomerado urbano entre 1905 e 2001.

### **Análise espacial urbana em SIG**

A base de dados digital com escala 1:100.000 e coordenadas UTM foi utilizada para localizar e considerar a Praça da Sé como o ponto inicial do desenvolvimento urbano de São Paulo, determinando a localização do ponto central com coordenadas (333.100; 7.394.900). A partir deste ponto central foi processada uma imagem com valores contínuos de distância em metros, na qual os valores aumentam com a afastamento do ponto de referência. Esta imagem de distâncias foi reclassificada e gerou uma imagem de distâncias com intervalos de 1.000m, estruturados em círculos concêntricos com raios variando de 1km a 55km, este intervalo de 1km foi escolhido para manter o mesmo tamanho de janela de observação para as diferentes datas analisadas. Para cada círculo concêntrico foram calculados seus valores de área (m<sup>2</sup>) e de perímetro (m).

Os mapas do aglomerado urbano da região metropolitana de São Paulo em datas 1905, 1914, 1930, 1940, 1952, 1962, 1972, 1996 e 2001 foram, individualmente, sobrepostos à imagem dos círculos concêntricos, gerando-se nove mapas. Os mapas resultantes apresentaram as variações na extensão de ocupação da terra por área construída a partir do afastamento do ponto central e inicial do desenvolvimento urbano (Tabela 1).

**Tabela 1 - Variação da ocupação da terra por área construída na RMSP a partir da Praça da Sé**

Data do aglomerado urbano da RMSP	Raios aproximados em relação à Praça da Sé
1905	1 – 10km
1914	1 – 9km
1930	1 – 22km
1940	1 – 21km
1952	1 – 31.000m
1962	1 – 53.000m
1972	1 – 52.000m
1996	1 – 55.000m
2001	1 – 52.000m

Foram utilizados os resultados obtidos nas comparações entre ocupação por área urbana e distâncias a partir do centro nas diferentes datas. Para ca data analisada foram calculados os valores de área e perímetro das classes de ocupação por área construída em cada círculo concêntrico ocupado. A figura 1 demonstra como exemplo o aglomerado da RMSP em 2001. Assim, os valores de área e perímetro de cada círculo concêntrico foram utilizados na estimativa e análise da dimensão fractal dos aglomerados urbanos de diferentes datas, permitindo a avaliação do desenvolvimento urbano da região metropolitana de São Paulo.

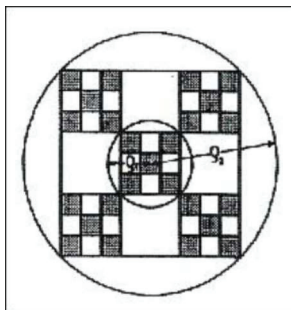
**Figura 1 - Representação do aglomerado urbano da RMSP, por raios de 5km, em 2001**



*Estimativa da Dimensão Fractal do Aglomerado Metropolitano de São Paulo*

Na obtenção dos valores de dimensão fractal, utilizou-se a associação do método de círculos concêntricos com o método de contagem de células. Para a mensuração da dimensão fractal baseada na medida de densidade do objeto, a partir do número de partes ou valor de área ocupada por cada círculo concêntrico e valor de área de ocupação por área construída, considerando a resolução fixa  $r$  e valor de comprimento de cada raio ( $Q$ ) (Figura 2).

**Figura 2 - A determinação da dimensão fractal por contagem do número de elementos no interior da circunferência com raio variável ( $Q_1, Q_2$ ).**



Fonte: FRANKHAUSER (1994)

A relação perímetro-área ( $D_{PA}$ ) foi utilizada para mensuração da dimensão fractal do aglomerado urbano da RMSP. Nesta relação, o coeficiente  $D_{PA}$  representa uma medida empírica que estima o quão são fragmentários os limites ou bordas das áreas construídas nas diferentes datas. A partir do perímetro  $L(r)$  das áreas construídas em cada círculo concêntrico, foi

realizada a relação entre o valor do perímetro e o valor de área estimado para as áreas construídas em cada círculo concêntrico, este procedimento foi aplicado em cada data analisada. Outra relação foi utilizada para estimar a dimensão fractal, a qual relacionou o comprimento de raio e o perímetro da área construída em cada variação do comprimento do raio, denominada relação perímetro-resolução ( $D_{PR}$ ).

Os valores de área e de perímetro em cada data estudada foram utilizados para se construir por regressão linear do  $\log$  do perímetro x  $\log$  da área os diagramas de Richardson. Pela regressão foram definidos o valor de  $g$  (constante de proporcionalidade) e  $f(D)$  a inclinação da regressão. Assim  $D_{PA}$  pode ser derivado dada uma estimativa da inclinação, utilizando a equação 3.10. Onde,  $\log g$  é o intercepto e  $f(D)=D/2$  é a inclinação da regressão linear.

Na relação perímetro-resolução para cada data, foi realizada a regressão linear do  $\log$  do perímetro da área construída x o  $\log$  do comprimento do raio. Os resultados obtidos foram utilizados na equação 3.11, onde  $a$  é a constante de proporcionalidade e  $g(D)$  uma função igual  $(1-D)$  e representa a inclinação da regressão linear.

## Resultados e Discussão

Os valores de dimensão fractal para o aglomerado urbano de São Paulo, a partir dos métodos perímetro-área e perímetro-resolução estão apresentados nas tabelas 2 e 3.

**Tabela 2 - Valores de dimensão fractal obtidos pelo método da relação perímetro-área, no período 1905-2001, para a RMSP**

	Período Analisado								
	1905	1914	1930	1940	1952	1962	1972	1996	2001
$R$ (km)	1-10	1-9	1-22	1-21	1-31	1-53	1-52	1-55	1-52
$D_{PA}$	1,6999	1,3760	1,1932	1,5171	1,1945	1,4640	1,2430	1,3274	1,5886
$D(PA)_{min}$	1,5224	1,2650	1,0401	1,3780	1,0496	1,3334	1,1103	1,1588	1,4208
$D(PA)_{max}$	1,8262	1,4524	1,6273	1,5870	1,2670	1,5318	1,3076	1,3968	1,7537

$R$  (km): comprimento do raio a partir do centro urbano;

$D_{PA}$ : valor médio de dimensão fractal pelo método perímetro-área;

$D(PA)_{min}$ : valor de dimensão fractal pelo método perímetro-área no mínimo raio de crescimento urbano;

$D(PA)_{max}$ : valor de dimensão fractal pelo método perímetro-área no máximo raio de crescimento urbano.

No método perímetro-área,  $D_{PA}$  representa a medida de quanto a linha do contorno urbano afasta-se de uma linha reta ( $D_{PA}=1$ ), indicando assim, a sinuosidade do perímetro urbano e o quanto sua respectiva área de ocupação é fragmentada. Por esta relação, os valores de  $D_{PA}$ , aproximam-se 1, à medida em que a expansão da área construída ocupa o espaço de forma ordenada, não alterando o contorno do limite urbano. Por outro lado, quando o valor de  $D_{PA}$  aproximam-se de 2, o perímetro apresenta contorno irregular, a área

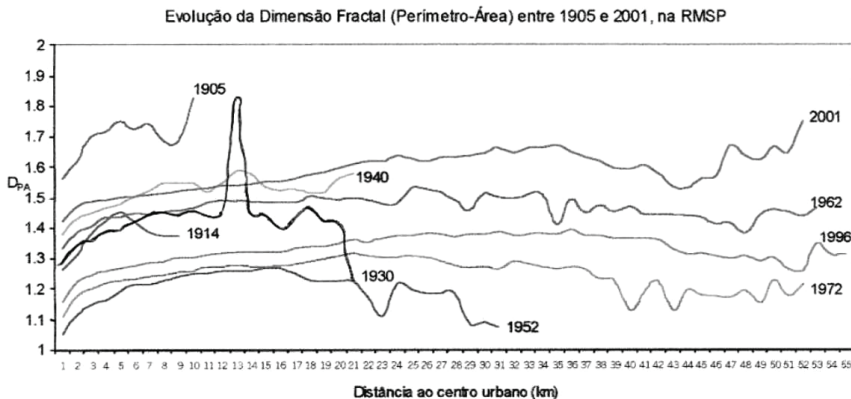
ocupada é mais fragmentada, caracterizando uma distribuição espacial desordenada da ocupação das áreas construídas, que podem estar associadas a restrições físicas e/ou de ordem socioeconômica.

A partir dos valores apresentados  $D_{PA}$ , pode-se destacar a grande fragmentação do aglomerado urbano em 1905 (1,69). Estes valores mostram-se variados de 1914 até 1940, alternando períodos de menor e maior fragmentação. Em 1952 atingiu o menor valor máximo de  $D_{PA}$  igual a 1,26, constatando-se nesta data uma aglomeração urbana menos fragmentada e com melhor distribuição espacial das áreas construídas. O valor apresentado em 1962 (1,46) demonstrou um aumento na fragmentação da área construída que posteriormente diminuiu, atingindo em 1972 o valor de 1,24. Em 2001 o valor de  $D_{PA}$  foi de 1,58, indicando novamente a fragmentação do aglomerado urbano.

Os resultados obtidos para o aglomerado urbano de São Paulo (Tabela 2), são comparáveis com o valor de áreas urbanas com grande concentração populacional, como Norwich (1,202) e King's Lynn (1,246), ambas na Inglaterra (BATTY; LONGLEY, 1994).

A figura 3, mostra o comportamento da forma do aglomerado urbano ao longo do tempo, como função das variações nas distâncias do centro à periferia da região metropolitana de São Paulo.

**Figura 3 - Evolução dos valores de  $D_{PA}$ , calculados pela relação perímetro-área em função do tempo e da distância a partir do centro urbano do aglomerado urbano de São Paulo**



As curvas demonstram que os anos de 1905, 1930, 1952, 1996 e 2001 apresentaram maior variação em relação as demais, quando comparados aos valores de  $D_{PA}$  entre regiões centrais e periféricas. As oscilações dos valores de dimensão fractal mostram uma expansão das áreas construídas, ocupando de forma desproporcional espaços periféricos da região metropolitana.

A relação perímetro-resolução é um procedimento que, associado à relação perímetro-área, propõe estimar a ordem e a orientação da distribuição do aglomerado urbano a partir da rugosidade da linha do perímetro da área construída. Os valores de  $D_{PR}$  nesta

relação, também variam entre 1 e 2, sendo 1 o valor que denota nenhum efeito da resolução sobre o formato da linha do perímetro, indicando maior regularidade do contorno, em virtude de uma ocupação mais homogênea do espaço. Por outro lado, quando os valores de  $D_{PR}$  tendem a 2, há uma indicação de maior influência da resolução sobre o contorno do perímetro, que se apresenta mais irregular quanto maior for a resolução utilizada, significando uma maior heterogeneidade da ordem de ocupação do espaço. A Tabela 3, apresenta os resultados desta relação para o aglomerado urbano de São Paulo.

**Tabela 3 - Valores de dimensão fractal obtidos pelo método da relação perímetro-resolução, no período 1905-2001, para a RMSP**

	Período Analisado								
	1905	1914	1930	1940	1952	1962	1972	1996	2001
$R$ (km)	1-10	1-9	1-22	1-21	1-31	1-53	1-52	1-55	1-52
$D_{PR}$	1,7924	1,9227	1,8727	1,8614	1,8608	1,7714	1,8231	1,9083	1,9233
$D(PR)_{min}$	1,4160	1,7332	1,4704	1,4656	1,2084	1,5136	1,4113	1,6219	1,4156
$D(PR)_{max}$	2,0190	2,0349	2,0268	2,0331	2,0198	2,0007	2,0010	2,0305	2,0402

$R$  (km): comprimento do raio a partir do centro urbano;

$D_{PR}$ : valor médio de dimensão fractal pelo método perímetro-resolução;

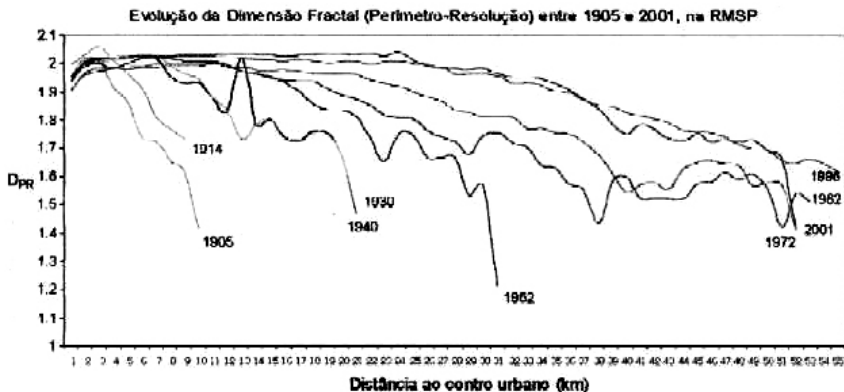
$D(PR)_{min}$ : valor de dimensão fractal pelo método perímetro-resolução no mínimo raio de crescimento urbano;

$D(PR)_{max}$ : valor de dimensão fractal pelo método perímetro-resolução no máximo raio de crescimento urbano.

A figura 4 apresenta o comportamento dos valores  $D_{PR}$  (relação perímetro-resolução) em cada círculo concêntrico para as data analisada.

Em todas as datas analisadas, os valores de  $D_{PR}$  se apresentam próximos a 2 nas áreas centrais, indicando o grande efeito da resolução sobre o detalhamento do contorno das linhas, revelando uma alta rugosidade.

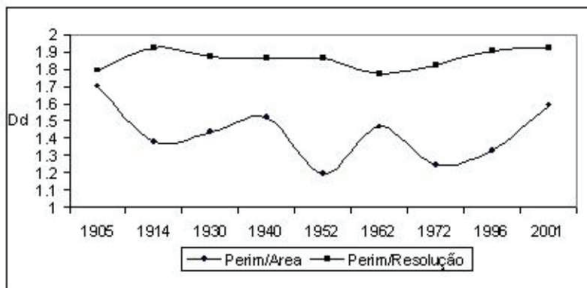
**Figura 4 - Evolução dos valores de  $D_{PR}$ , calculados pela relação perímetro-resolução em função do tempo e da distância a partir do centro urbano do aglomerado urbano de São Paulo**



A irregularidade da dimensão fractal revela a existência de diferentes formas de ocupação urbana ao longo do tempo e do espaço metropolitano de São Paulo, que está relacionada a fatores físicos como padrão do uso da terra, tecnologia de construção, demanda para residências, tamanho da construção, população e viabilidade de transporte. Pode-se verificar pelos valores médios de  $D_{PR}$  (Tabela 3) uma distribuição menos uniforme das estruturas ao longo do espaço urbano. Valores de  $D_{PR}$  apresentados por Batty e Longley (1994) para estruturas urbanas que tendem a ocupar o espaço de forma menos organizada, como áreas residenciais (1,447) e áreas comerciais e industriais (1,499), confirmam uma ausência na organização da distribuição das estruturas urbanas, desde o início da urbanização até as datas mais atuais, as quais apresentam valores mínimos de  $D_{PR}$  acima de 1,415, á exceção do ano de 1952, que apresentou valor mínimo de 1,208, sugerindo maior homogeneidade da ocupação do espaço urbano.

A figura 5 permite comparar o comportamento da média dos valores de dimensão fractal ao longo das datas analisadas, determinados pela densidade de ocupação e pelas relações perímetro-área e perímetro-resolução.

**Figura 5 - Valores médios de dimensão fractal nas datas analisadas determinados pelos métodos de perímetro-área e perímetro-resolução**



A relação perímetro-resolução, em todas as datas analisadas, apresenta altos valores de dimensão fractal, indicando maior rugosidade dos contornos periféricos, que retrata uma ocupação densa e heterogênea das estruturas urbanas ao longo do espaço. Os valores de  $D_{PA}$  oscilam de forma oposta por aqueles apresentados pela relação perímetro-resolução. A análise da dimensão fractal pela relação perímetro-área indica menor fragmentação da área do aglomerado urbano em relação ao seu perímetro quanto mais densificado for o espaço e maior rugosidade apresentar o perímetro deste espaço.

A maior fragmentação do aglomerado urbano é constatada em 1905, como mostra o valor de  $D_{PA}$  e também pelos valores de dimensão fractal obtidos pela relação perímetro-resolução, indicando menor sinuosidade do perímetro urbano. A intensificação da imigração, instalação de indústrias têxteis, alimentícias e químicas, implantação da rede rodoviária, aumento do número de trabalhadores assalariados, intensificação do comércio e do transporte pelo crescimento da economia cafeeira são fatores socioeconômicos considerados responsáveis pela caracterização espacial deste período.

Em 1914, o valor  $D_{PA}$  (perímetro-área) indica uma redução da fragmentação do aglomerado urbano, enquanto o valor de  $D_{PR}$  (perímetro-resolução) denota o aumento da rugosidade por área construída, o que significa uma densificação heterogênea das estruturas espaciais.

Entre 1930 a 1950, os valores elevados e relativamente estáveis de  $D_{PR}$  retratam uma ocupação heterogênea do espaço urbano da área metropolitana de São Paulo. O comportamento de  $D_{PA}$  mostra-se variado neste período. Desde de 1914 até 1940 o valor de  $D_{PA}$  retrata um aumento na fragmentação da área urbana. Esta fragmentação esta associada ao desenvolvimento das vias de transporte, ao deslocamento das áreas industriais e residenciais para áreas periféricas e à incorporação dos municípios de Santo André, São Bernardo e São Caetano à metrópole.

A melhor distribuição espacial da área urbana, segundo o valor de  $D_{PA}$  obtido pela relação perímetro-área, ocorreu em 1952. Nesta data, a integração dos municípios de Guarulhos, Diadema, Mauá e Osasco tornaram a aglomeração urbana menos fragmentada. Na década de 60, o aumento de  $D_{PA}$  apresentados em 1962, constata a saturação do aglomerado urbano demonstrada por uma fragmentação da área construída.

Em 1972, o valor de  $D_{PA}$  apresenta um declínio quando comparado ao de 1962, constatando a uniformidade da distribuição da área urbana no espaço, quase semelhante à apresentada em 1952. A consolidação do processo de metropolização foi um dos principais elementos determinantes deste resultado. A partir de 1972, o valor de  $D_{PA}$  aumenta progressivamente até 2001, indicando crescente fragmentação do aglomerado urbano. O processo de descentralização das atividades econômicas contribuiu para a fragmentação, promovendo o deslocamento dos estabelecimentos comerciais e industriais para as áreas intermediárias e periféricas ao longo das principais vias de transporte e assim estimulando afastamento das áreas residenciais, a segregação econômica, aumento da favelização, o surgimento da auto-segregação e a consolidação dos sub-centros.

## Conclusões

A dimensão fractal estimada pelo método perímetro-área fornece parâmetros que caracterizam o processo de expansão pela sinuosidade do perímetro urbano, a medida em que as áreas tendem a ser ocupadas de modo mais ou menos homogêneo. Os valores de dimensão fractal obtidos por esta relação mostram que a região metropolitana de São Paulo, durante o período analisado, apresentou alternância na homogeneidade da distribuição espacial, sendo mais freqüentes os valores de  $D_{PA}$  que indicam a fragmentação da área. Esta relação também manifesta o padrão de expansão do aglomerado, verificando que a melhor distribuição da ocupação espacial é um fator prévio e determinante da ocupação de novas áreas, as quais apresentarão áreas fragmentadas e contornos sinuosos ao se expandirem, mas tornarão a reduzir a sinuosidade do contorno para repetir o processo.

A distribuição das estruturas urbanas na região metropolitana de São Paulo, quando analisada pelo método perímetro-resolução, demonstrou grande efeito da resolução sobre a rugosidade do perímetro urbano, indicando pouca organização na distribuição espacial das estruturas no aglomerado urbano.

A aplicação da dimensão fractal na análise do processo de expansão do aglomerado urbano de São Paulo, apresentou-se adequada para a identificação do comportamento espacial do aglomerado pela quantificação dos fatores espaciais representativos deste processo, como área, tamanho e forma urbana. Associação de valores de dimensão fractal com dados socioeconômicos, históricos, físicos e legislações vigentes contribuíram para determinar a influência dos fatores físicos e antrópicos sobre a estruturação e crescimento do aglomerado urbano. No entanto, a limitação na aquisição da informação, como as diferenças na interpretação de dados de uso e ocupação da terra, topografia e as características dos dados orbitais interferem na resolução da imagem e na interpretação dos objetos da superfície terrestre, o que pode influenciar na análise temporal da dimensão fractal.

## Referências

BATTY, M; LONGLEY, P. The fractal simulation of urban structure. **Environment and Planning**, Londres, v. 18, p. 1143-1179, 1986.

BATTY, M; LONGLEY, P. The morphology of urban land use. **Environment and Planning**, Londres, v. 15, p. 461-488, 1988.

BATTY, M; LONGLEY, P. **Fractal cities**. San Diego: Academic Press, 1994. 394 p.

BATTY, M.; LONGLEY, P.; FOTHERINGHAM, A. S. Urban growth and form: scaling, fractal geometry, and diffusion-limited aggregation. **Environment and Planning**, Londres, v. 21, p. 1447-1472, 1989.

FRANKHAUSER, P. Fractal properties of settlement structures. In: INTERNATIONAL SEMINARY ON STRUCTURAL MORPHOLOGY, 1, Montpellier, 1992, **Proceedings...**, Montpellier, 1992.

FRANKHAUSER, P. **La fractalité des structures urbaines**. Paris: Anthropos, 1994, 291p.

GOODCHILD, M. Fractals and the accuracy of geographical measures. **Mathematical Geology**, Nova York, v. 12, n. 2, p. 85-98, 1980.

LONGLEY, P. A.; BATTY, M. Fractal measurement and line generalization. **Computers & Geosciences**, Nova York, v. 15, n.2, p. 167-183, 1989.

LONGLEY, P.; MESEV, V. Measuring urban morphology using remotely-sensed imagery. In: DONNAY, J. P. **Remote sensing and urban analysis**. Nova York: Taylor Francis, 2001. p. 163-183.

PRATES, R. C. **Reestruturação da metrópole paulista: o processo de descentralização industrial**. 2001.142 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Letras e Ciências Humanas – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

SOUZA, M. L. **O desafio metropolitano**. Um estudo sobre a problemática sócio-espacial nas metrópoles brasileiras. São Paulo: Bertand Brasil, 1999. 366 p.

TOLEDO, B. L. **Prestes Maia e as origens do urbanismo em São Paulo**. São Paulo: Empresa das Artes, 1996. 317 p.

VILLAÇA, F. **A estrutura territorial da Metrópole sul brasileira**. São Paulo: USP-FFLCH, Departamento de Geografia, 1978. 230 p.



