

Revista Brasileira de Cartografia (2016), Nº 68/4, Edição Especial Geoinformação e Análise Espacial: 779-795  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## ANÁLISE ESPACIAL DA ACESSIBILIDADE NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO ATRAVÉS DE SELF ORGANIZING MAPS

*Accessibility Spatial Analysis from São Paulo City through Self Organizing Maps*

**Renato Arbex, Martina Pacifici, Lucas Rios, Cleyton Carneiro  
& Mariana A. Giannotti**

**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP**

**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP**

Edifício de Engenharia Civil (Edif. Paula Souza) - Av. Prof. Almeida Prado, 83 - Butantã,  
São Paulo - SP, 05508-070, Brasil

{renatoarbex, cleytoncarneiro, mariana.giannotti}@usp.br, martinapacifici@yahoo.it, lucas.machado.rios@hotmail.com

*Recebido em 11 de Outubro, 2015/Aceito em 7 de Janeiro, 2016*

*Received on October 11, 2015/ Accepted on January 7, 2016*

### RESUMO

A mobilidade urbana tornou-se um dos maiores problemas nas grandes cidades contemporâneas. Considerável tempo da população destas cidades é desperdiçado em meios de transportes, quando precisam se deslocar para realizar suas atividades do cotidiano. Indicadores de acessibilidade são utilizados para caracterizar essa dificuldade que as pessoas têm em acessar as oportunidades na cidade. Neste trabalho foi feita uma avaliação da distribuição espacial da acessibilidade na cidade de São Paulo. Para esta caracterização foram utilizadas metodologias de análise espacial como o cálculo de densidade *Kernel*, indicadores *Moran* e *Self Organizing Maps (SOM)*. Foi investigada a correlação entre a acessibilidade a equipamentos, as quantidades de embarques e renda média dos usuários. Foi calculado um índice de acessibilidade que representa a quantidade de equipamentos urbanos acessíveis em 30 minutos e, a partir da espacialização deste índice e de outras variáveis como renda e ocorrências relativas ao primeiro embarque dos usuários, pôde-se visualizar padrões de segregação espacial na cidade. Foi possível ainda ressaltar a concentração de equipamentos urbanos nas áreas centrais da cidade, sendo esta bem evidente nas categorias de Lazer e Compras, enquanto muito mais espalhada no caso de Saúde e Educação. O mapeamento dos locais em que ocorre o primeiro embarque mostrou que os moradores mais afastados do centro precisam se submeter a tempos de viagem maiores que 30 minutos para acessar seus destinos finais, assim como iniciar suas viagens em horários muito cedo, como 4h e 5h da manhã de um dia útil. Analisando conjuntamente renda, oferta de transporte público e bilhetagens observou-se que os moradores da periferia possuem baixa renda e baixa acessibilidade. Simultaneamente, os mesmos habitantes constituem o 70% da totalidade das bilhetagens analisadas. Daqui resulta que o serviço de ônibus é o principal meio de transporte usado pelas pessoas com baixa renda, que vivem nos subúrbios e que acordam muito cedo de manhã para atravessar a cidade. A aplicação da técnica *SOM* permitiu um agrupamento de zonas de tráfego com características semelhantes de renda, uso do sistema de transporte público e acessibilidade, permitindo encontrar as disparidades e detalhar a caracterização da distribuição espacial heterogênea, além de destacar as principais áreas que merecem mais atenção do poder público para a melhoria de acessibilidade, em especial, enfatizando as condições precárias que se encontra a população mais carente da cidade.

**Palavras chaves:** Acessibilidade, Mapas Auto-Organizáveis, São Paulo, Dados de Bilhetagem.

## ABSTRACT

Urban mobility has become a major problem in large contemporary cities. Time is wasted in transport, when people need to move to accomplish their daily activities. Accessibility indicators have been used to characterize the difficulty that people have in accessing the opportunities in the city. In this work, an assessment of the spatial distribution of accessibility in the city of São Paulo, as well as, a characterization through spatial analysis methods as the *Kernel* density, *Moran* indicators and *Self Organizing Maps (SOM)*. The correlation between accessibility to equipment, the quantity of boardings and average income of users was investigated. An accessibility index was calculated which represents the amount of affordable urban infrastructure in 30 minutes and from the spatial distribution of this index and other variables such as income and first boarding transactions, it was possible to visualize spatial patterns of segregation in the city. It was also possible to emphasize the concentration of urban facilities in the central areas of the city, which is evident in the categories of leisure and shopping, while more widespread in the case of health and education. The mapping of first smart-card boarding showed that the most distant downtown residents need to undergo major travel times longer than 30 minutes to access their final destinations, as well as start your travels in very early times, as 4am and 5am the morning of a working day. By analyzing income, public transport supply and smart-card data it was observed that the inhabitants of the suburbs have low income and low accessibility. Simultaneously, the same population constitute 70% of all analyzed smart- cards. It follows that the bus service is the main means of transportation used by people with low income, living in the suburbs and they wake up very early in the morning to cross the city. The *SOM* allowed a grouping of traffic analysis zones with similar characteristics of income, use of public transportation and accessibility, allowing the identification of gaps and detailed characterization of heterogeneous spatial distribution, in addition to highlighting the main areas that deserve more attention from the public authorities to improve accessibility, particularly emphasizing the precarious conditions from the poorest population of the city.

**Keywords:** Accessibility, *Self Organizing Maps*, São Paulo, Smart-Card Data.

## 1. INTRODUÇÃO

A falta de uma mobilidade urbana eficiente tornou-se um dos maiores problemas na cidade contemporânea. Em consequência disto, uma boa parte do tempo é desperdiçado nos meios de transportes, sejam eles carros, ônibus ou trens superlotados. Esta ineficiência é responsável pela relativa imobilidade de grande parcela da população. Para os pobres, que moram na periferia por causa de seu baixo poder aquisitivo, esta imobilidade se converteu em isolamento. Assim, a metrópole fragmentada ou, pior, desintegrada, transformou-se em um conjunto de guetos homoganeamente distribuídos. (MARICATO, 2013; SANTOS, 1990).

Mobilidade e acessibilidade são atributos que conjuntamente afetam a qualidade da vida urbana da cidade. Eles não são coincidentes. Se o primeiro constitui um conjunto de oportunidades de interações, ou seja, a habilidade de movimentar-se tendo em vista as necessidades humanas para diversos fins, a segunda esta definida para Hansen como a medida da intensidade das possibilidades de interação e ligada às características inerentes de dado local. Por isso, a distribuição espacial destas interações que segue é um resultado dependente de muitos fatores. (HANSEN, 1959;

SANTOS, 1990; VASCONCELLOS, 1998; VASCONCELLOS, 2001; RAIJA JR; CORRÊA, 2006).

Na análise do sistema urbano a acessibilidade é um dos fatores essenciais a serem considerados, tendo em vista uma organização espacial equilibrada das oportunidades em conjunto com uma rede de transporte. Estas oportunidades são os pontos de interação aos quais se podem acessar, como locais de trabalho, lazer, serviços, compras, etc. (HANSEN, 1959). As características de impedâncias inerentes ao deslocamento, como o tempo e a distância, também devem ser consideradas quando analisamos o conceito de acessibilidade (INGRAM, 1971).

A atual estrutura morfológica de São Paulo foi produzida, ao longo do tempo, pela rápida acumulação urbana que logo cresceu adaptando-se ao processo de desenvolvimento industrial e à topografia do lugar. “Em pouco mais de uma geração a partir dos meados deste século, o Brasil, um país predominantemente agrário, transformou-se em um país virtualmente urbanizado” (CSABA, 1999 p.11).

Consequentemente, em meados do século XX, “o processo de industrialização e urbanização, sob o lema positivista da ordem e

do progresso, parecia representar um caminho para a independência de séculos de dominação da produção agrícola” (MARICATO, 1996, p. 55).

A abolição da escravatura junto a imigração estrangeira e ao desenvolvimento da lavoura cafeeira deram origem a um mercado interno geograficamente concentrado (FURTADO, 2009) criando condições favoráveis para um desenvolvimento industrial em São Paulo. Tendo em vista esse contexto, o crescimento da cidade no início do Século XX foi marcado pela ocupação de indústrias em volta da área central da cidade. Nesse mesmo período, a rede ferroviária implantada na região norteou a organização espacial das áreas mais afastadas, pois a maioria dessas indústrias se instalaram próximas às vias férreas e estimularam seus funcionários a ocuparem o entorno dessas estações (LAMGENBUCH, 1971).

No período entre os anos 1915-1940, observa-se o desenvolvimento dos subúrbios com características industriais e uma intensa ocupação residencial. Nesse momento as estações ferroviárias serviram como ponto de convergência de produtos e pessoas, além da contribuição dos bondes que ajudaram na consolidação da ocupação territorial ligando os loteamentos residenciais periféricos às áreas centrais. (LAMGENBUCH, 1971; MEYER; GROSTEIN; BIDERMAN, 2004).

A partir da década de 1940, o desenvolvimento dos subúrbios e a facilidade do deslocamento férreo promoveram o deslocamento de uma maior quantidade de usuários para o centro. Observam-se nesse período movimentos pendulares em horários de pico e a ineficiência do sistema férreo para tamanha demanda. Nesse momento os ônibus surgiram como opção de complementariedade ao sistema de transportes, atendendo à demanda reprimida e proporcionando novas rotas de deslocamento e maior conforto aos usuários (LAMGENBUCH, 1971).

Este desenvolvimento do transporte rodoviário foi impulsionado através do Plano de Avenidas elaborado por Prestes Maia entre os anos 1920-1930 o qual contribuiu para construção de vias radiais e promoveu a valorização imobiliária de novas áreas em detrimento de outras mais afastadas (VILAÇA, 2001).

Na década de 1970, São Paulo vivenciou um período de grande explosão demográfica marcada por uma ocupação territorial e grande migração

populacional, oriundos do interior do estado e demais estados, devido a forte concentração industrial na Região Metropolitana de São Paulo o qual propiciou maiores oportunidades de emprego (MARICATO, 2003).

Segundo Santos (1990, p. 76), “em 1975, a parte das viagens feitas em ônibus na Grande São Paulo alcança 91% do total das viagens por meios coletivos de transporte, ficando 6% para os trens e 3% para o metrô. Mas o número relativo de viagens em ônibus diminui relativamente entre 1977 e 1983, passando de 89,1 a 83,1% do total, em favor do metrô, que representava 5,6% das viagens, em 1977, e 10,1% em 1983” (SANTOS, 1990).

Na Zona Sul, a ocupação mais acentuada ocorreu em áreas de proteção ambiental devido à proximidade dessas áreas em relação às indústrias localizadas nessa região. Já na Zona Leste, entre os anos 1977 e 1988, a ocupação ocorreu incentivada pela construção de loteamentos para população de baixa renda, o qual aumentou a concentração de residências e os movimentos pendulares entre o subúrbio e o centro (VILAÇA, 2001; MEYER; GROSTEIN; BIDERMAN, 2004).

Entretanto, os serviços urbanos e a infraestrutura da cidade não alcançam o desenvolvimento urbano na mesma velocidade na periferia. Desta forma, para acessar esses serviços os moradores levam mais tempo e têm maiores gastos com deslocamentos. Considere-se que o tempo médio das viagens em São Paulo foi calculado como 2 horas e 42 minutos. Para 1/3 da população esse tempo é de mais de 3 horas. Para 1/5 são mais de 4 horas, segundo Pesquisa Origem Destino da Cia do Metrô de São Paulo, realizada em 2007 (MARICATO, 2013). Como o tempo gasto com o transporte coletivo aumenta, o tempo livre do trabalhador se reduz, o desgaste físico e mental cresce, como se estes tratassem de um “prolongamento” da jornada de trabalho (SANTOS, 1990).

A possibilidade de acessar equipamentos urbanos de fato não é homoganeamente distribuída em termos de custo e tempo para todas as origens. Para longe do centro a oferta de equipamentos de saúde, abastecimento, educação, cultura e esporte são menores e, quando existem, não tem a mesma qualidade. Por os jovens, esta falta de oferta em conjunto com as condições de viagens muito caras, resulta em viver o destino do “exílio

na periferia”, como cunhou Milton Santos (SANTOS, 1990). “A fixação da população na periferia não tem sido acompanhada pela implantação ou ampliação de um sistema de transportes coletivos adequado, seja por fatores de escassez de recursos, ou pela existência de obras consideradas mais prioritárias. Isto se traduz na perda de qualidade de vida desta parte da população, seu transporte para os locais de trabalho é oneroso e operado em condições precárias” (BARAT, 1979).

A partir dessas considerações, o desafio da análise apresentada é entender como se distribui essa variação espacial da acessibilidade na cidade, considerando informações como tempos de viagens em condições de congestionamento na megacidade de São Paulo.

O objetivo principal deste artigo é estudar a distribuição espacial da acessibilidade na cidade de São Paulo, através da correlação entre indicadores de acessibilidade temporais (oferta) com variáveis quantitativas de embarques observados e renda média dos usuários (demanda). Assim, entre os objetivos específicos estão: criar um índice de acessibilidade considerando a quantidade acumulada de oportunidades que podem ser acessadas em um intervalo de tempo a partir de um dado local; avaliar a existência de segregação espacial através desse índice de acessibilidade ao procurar correlacionar com outras variáveis socioeconômicas, como renda; e, por fim, analisar a correlação entre a quantidade de embarques verificados no sistema de transporte público com o índice de acessibilidade desenvolvido.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No âmbito urbano, a questão da “Acessibilidade” presta-se a ser investigada a partir de vários aspectos. Muitas pesquisas adotam diferentes definições do atributo “acessível”. Cada definição oferece uma sugestão e o conjunto destas se complementa. Essa riqueza de abordagens merece atenção, além de mostrar a diversidade da questão e a centralidade do seu papel.

Dentre o conceito de acessibilidade mais abordado podemos ressaltar aquele definido por Hansen (1959) e complementado por Ingram (1971), que consideram o potencial das oportunidades em relação a uma determinada

localização, relativizado pelas impedâncias, as quais estão condicionadas pelo espaço e pelo tempo. Ou seja, as oportunidades de atividades acessíveis por moradores de uma determinada região, relacionadas às características da rede de transporte e seus custos de deslocamento estão relacionadas ao conceito de acessibilidade (CARRERA, 2002; VICKERMAN, 1974).

Nesse sentido Geurs e Van Eck (2001) evidenciam a importância de alguns pontos a serem analisados como: as qualidades e características dessas atividades, os modos de transporte, os diferentes horários e períodos, as condições socioeconômicas, etc.

Observa-se a existência de vários tipos de indicadores utilizados para medir a acessibilidade, dentre os quais aqueles derivados do modelo de Hansen são mais utilizados. Podem-se citar os indicadores baseados na localização e nos indivíduos os quais medem o número de oportunidades atingíveis em um determinado tempo (GEURS; VAN WEE, 2004).

Recentemente Páez *et al.* (2012) apresentou uma extensa revisão de vários trabalhos sobre o tema de indicadores de acessibilidade em transportes, em particular ao descrever seus aspectos prescritivos e descritivos. Os indicadores com características descritivas estão baseados nas experiências reais das pessoas em função de suas atividades e do espaço urbano. Já os prescritivos estabelecem um padrão e consideram o indivíduo uniformemente.

Salonen e Toivonen (2013) publicaram um estudo analisando a disparidade de acessibilidade entre diferentes o transporte individual e o coletivo. Os autores utilizaram, para cada modo, três modelos de complexidade. Para o transporte público, o modelo mais completo considera distâncias de caminhada, tempos de espera médios, eventuais transferências e tempos de percurso baseados em um planejador de rotas (*Journey Planner*) disponível ao público, inclusive considerando séries temporais de trânsito.

Com base neste modelo, Salonen e Toivonen (2013) calcularam quais as áreas da cidade de Helsinque poderiam ser acessadas através do transporte público em 20 minutos a partir de um ponto inicial específico desta cidade. Os autores também compararam essas áreas analisadas com aquelas acessíveis através

do automóvel, mostrando que, em média, o transporte público leva 39% tempo a mais que o transporte individual para os mesmos trajetos nas áreas centrais. Em relação aos subúrbios esta média chega a 63%, acentuando-se em muitos pares origem-destino os quais apresentam médias de 75% de tempo a mais para o transporte público. Assim, percebe-se que a acessibilidade desde modo é notadamente menor àquela proporcionada pelo transporte individual.

Com relação ao uso de dados de monitoramento por *GPS* da frota de ônibus para indicadores de acessibilidade, Pinelli *et al.* (2009) elaboraram uma metodologia de análise dos dados e propuseram um simulador de mobilidade para avaliar a acessibilidade de um dado local. Este simulador permitiu avaliar a quantidade de pontos de ônibus acessíveis a partir de um ponto inicial, nos intervalos de uma, duas ou três horas de viagem. Foi utilizado o valor de 100 metros como critério para permitir transferências para outras linhas, ou seja, chegado em um ponto, o usuário poderia andar 100 metros nos arredores e acessar as linhas de outros pontos.

Embora não tenha sido usado nenhum indicador de oportunidades acumuladas como em outros estudos, o estudo de Pinelli *et al.* (2013) na cidade de Roma mostrou que existe uma grande variabilidade entre a quantidade de pontos acessíveis ao longo do dia e em diferentes dias da semana, com um notável pico de acessos às 8 horas da manhã. A análise também foi conduzida para que todos os pontos de ônibus servissem como ponto de partida, permitindo observar que a acessibilidade sob esta ótica não está homoganeamente distribuída na cidade.

Owen e Levinson (2014) estudaram a acessibilidade a empregos em 46 regiões metropolitanas dos Estados Unidos através do transporte público. Os rankings foram determinados através de uma média ponderada de acessibilidade, dando um peso maior para empregos mais próximos. Àqueles acessíveis até 10 minutos foi dado o peso máximo, decrescendo até o mínimo de 60 minutos. Os tempos de viagem foram calculados utilizando uma ferramenta de código aberto chamada *Open Trip Planner*, que une informações relacionadas aos serviços de transporte público com a rede viária da cidade, tendo como base o *Open Street Map*. Embora não seja levado em consideração tempos

de viagem em regimes congestionados, Owen e Levinson (2014) apresentaram resultados os quais mostraram que cidades mais densas e com melhor infraestrutura de transporte público por trilhos oferecem melhor acessibilidade à sua população em geral, assim como mostram uma heterogeneidade espacial dos indicadores de acessibilidade.

### **3. METODOLOGIA**

Como metodologia este trabalho propõe uma análise que procura caracterizar espacialmente a acessibilidade a equipamentos urbanos no município de São Paulo. A abordagem dará ênfase à análise da correlação espacial destes indicadores de acessibilidade através do índice de *Moran*, assim como sua correlação com outras variáveis, tais como quantidade de embarques no transporte público observados nas zonas de tráfego e renda média da população, através da aplicação da técnica de *Self Organizing Maps (SOM)*.

### **4. APLICAÇÃO E RESULTADOS**

A metodologia proposta foi aplicada à cidade de São Paulo, Brasil. Como neste trabalho utilizaremos o conceito de acessibilidade conforme apresentado em Hansen (1959), considerando o potencial de oportunidades de interação, é necessário escolher o que representa essa possibilidade de interação. Foram escolhidos equipamentos urbanos como representações (*proxies*) físicas de locais de interação humana e realização de atividades. A base de dados de equipamentos escolhida é a utilizada pela empresa de transporte público de São Paulo, a SPTrans. A cada equipamento urbano está associado um código, nome, endereço, bairro e tipo de equipamento. Neste trabalho elaboramos uma classificação mais agregada dos equipamentos para coincidir com os motivos de viagem da pesquisa de Origem-Destino do Metrô SP, a saber: serviços (trabalho), estudo, saúde, lazer e compras. São ao todo 4349 equipamentos distribuídos na cidade.

Uma primeira caracterização dos equipamentos foi elaborada para conhecer melhor a distribuição espacial dos equipamentos considerando cada categoria. Inicialmente foram agrupados os equipamentos por categoria e por bairro de localização, cujos resultados

dos 10 bairros com maior quantidade de equipamentos estão representados no Quadro 1. Pode ser verificado que existe uma forte concentração dos equipamentos nos bairros das áreas centrais da cidade. O bairro de Bela Vista, onde está localizada a Avenida Paulista, agrega 28 equipamentos de lazer, em virtude da concentração de cinemas, centros culturais e teatros.

Em seguida, foi feita uma análise de

concentração espacial destes pontos através da técnica Estimativa de Densidade Kernel (*Kernel Density Estimators*), para todos os tipos de equipamentos. Na esquerda da Figura 1 está representado o *Kernel* para os equipamentos de Lazer, e sua distribuição real na direita da mesma figura. É possível constatar a concentração nas áreas central e oeste da cidade, enquanto que a zona leste é privada de uma distribuição homogênea de equipamentos de lazer.

Quadro 1: Concentração dos equipamentos nos bairros centrais

Bairro	Categorias									Total	% do Total
	Compras	Estudo	Institucional	Lazer	Outros	Saúde	Serviços	Transporte			
BELA VISTA	7	9	3	28	17	8	20	3	95	2.6%	
CENTRO	4	2	22	7	13	3	31	3	85	2.3%	
SANTO AMARO	7	11	2	4	8	16	15	4	67	1.8%	
CERQUEIRA CESAR	4	3	2	8	22	3	25		67	1.8%	
CONSOLACAO	4	5	3	10	14	4	24	2	66	1.8%	
VILA MARIANA	4	12	3	4	13	10	10	5	61	1.6%	
JARDIM PAULISTA	2		1	5	13	6	25		52	1.4%	
IPIRANGA	3	15	1	6	5	14	6	2	52	1.4%	
REPUBLICA	2	2	8	9	7		18	3	49	1.3%	
LIBERDADE	2	6	1	4	10	11	11	4	49	1.3%	
DEMAIS BAIROS (923)	234	1658	83	211	311	620	484	105	3706		

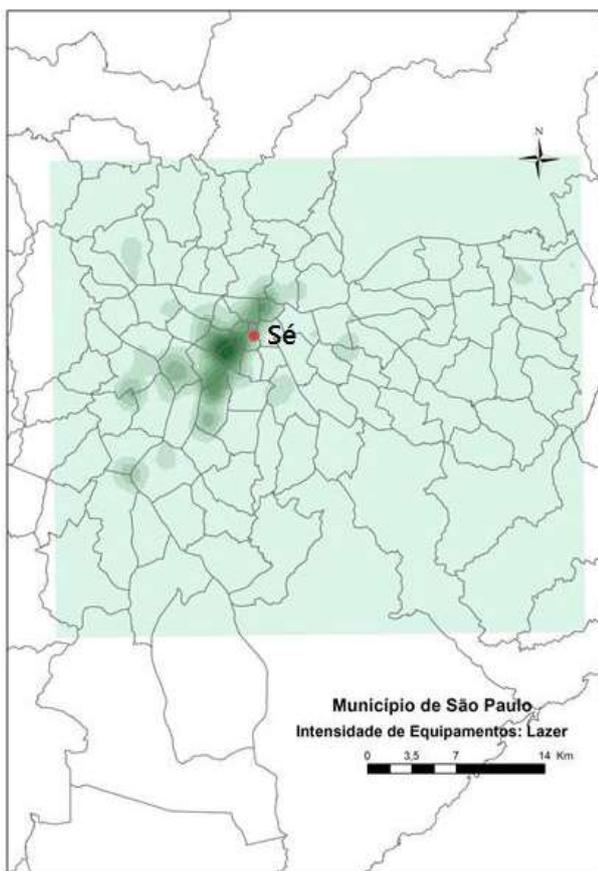


Fig. 1 - *Kernel* para equipamentos de lazer.

Na Figura 2 estão os resultados da análise do *Kernel* para a mesma base de equipamentos, porém considerando apenas equipamentos de saúde (esquerda) e equipamentos de educação (direita). Para os equipamentos de saúde, a princípio ocorre uma distribuição mais homogênea na cidade. Quanto à educação, existe uma maior distribuição nas periferias, o que pode ser explicado pela base não incluir escolas particulares.

Por fim, na Figura 3 está o *Kernel* de todos os equipamentos agrupados (esquerda), assim como a localização ponto a ponto dos equipamentos, sobreposto à imagem de satélite aérea da área urbana da Região Metropolitana de São Paulo pelo *Google Earth*. Embora exista uma concentração espacial nas áreas centrais, ainda mais acentuada que nos equipamentos de lazer, existem muitos equipamentos também nas áreas periféricas (principalmente saúde e educação).

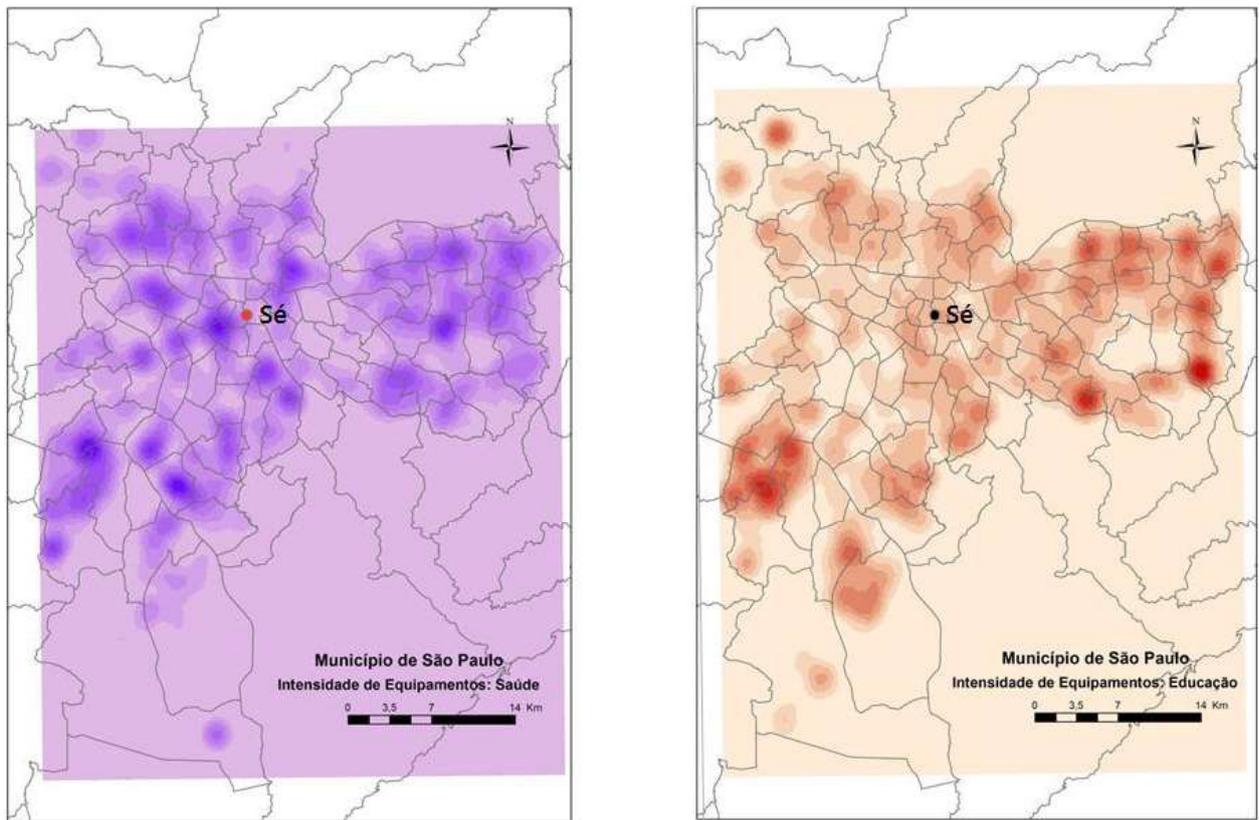


Fig. 2 - Kernel para Equipamentos de Saúde (esquerda) e Educação (direita).

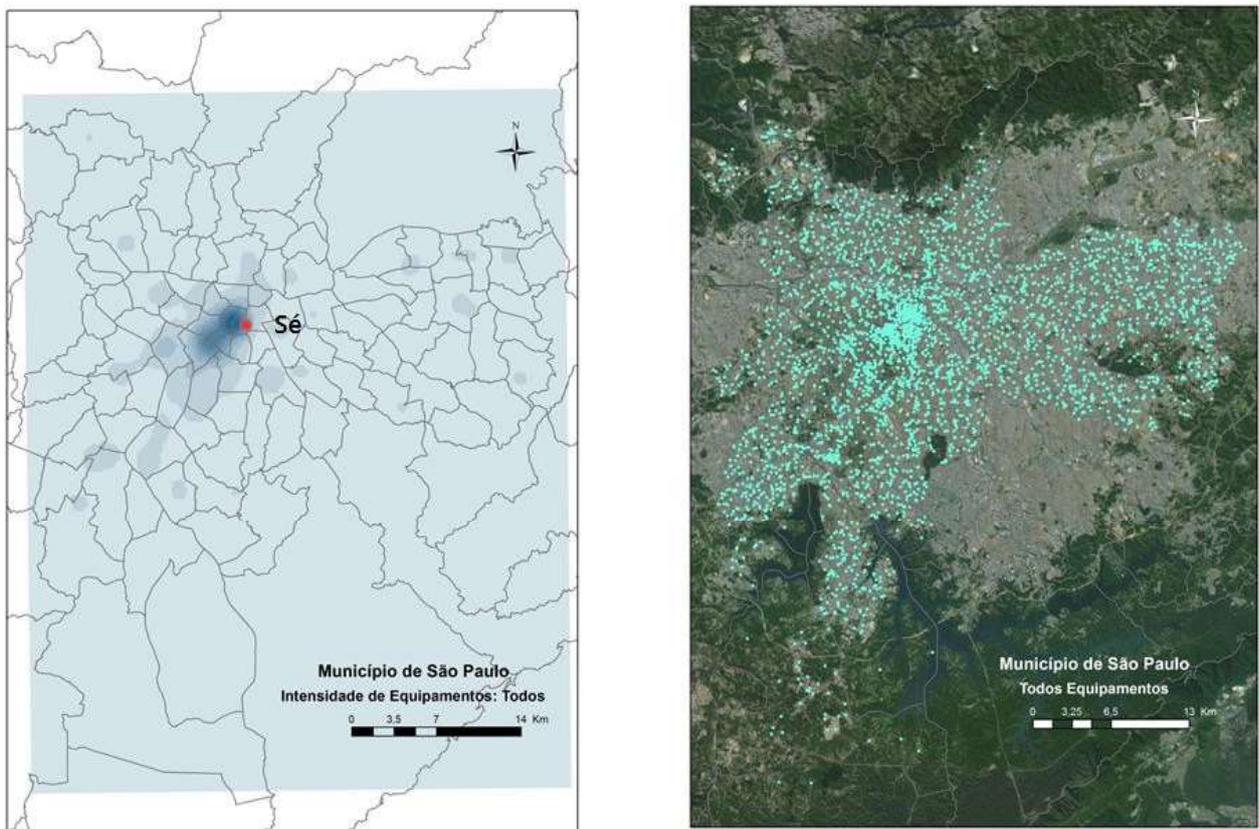


Fig. 3 Kernel considerando todos os equipamentos (esquerda) e suas localizações reais ponto a ponto (direita).

Desta forma, descritos os equipamentos urbanos e feita sua caracterização espacial, a segunda parte da metodologia foi calcular o Índice de Acessibilidade proposto, sendo a quantidade de equipamentos urbanos acessíveis, através de transporte público por ônibus, considerando um determinado tempo de viagem. O tempo de viagem adotado foi de 30 minutos, e, para uma primeira análise, todo o conjunto de equipamentos foi considerado para compor o índice.

O nível de desagregação em que foi calculado o índice foi de setor censitário. Para cada setor censitário, foram somados quantos equipamentos urbanos são acessíveis a partir de seu centroide, em um intervalo de até 30 minutos de tempo de viagem usando apenas o modo ônibus urbano municipal. Esse tempo de viagem é dado pela somatória do tempo de acesso (caminhada) ao ponto, o tempo de espera médio, o tempo de viagem em cada trecho percorrido e o tempo de acesso no destino, conforme Equação 1 (Cálculo do tempo de Viagem no transporte público). O detalhamento de como foi considerado cada componente está detalhado a seguir.

$$t_{total} = t_{acessoPto} + t_{esperaMédio} + \sum_{i=1}^n (t_{viagemTrecho} + t_{acessoDestino}) \leq 30 \text{ min} \quad (1)$$

- Tempo de Acesso ao Ponto (e ao destino): considerado até um limite de 10 minutos de

caminhada, ou aproximadamente 600 metros (caminhando com velocidade de 1 metro/segundo). O cálculo é feito considerando a distância em linha reta entre o usuário e cada ponto de ônibus, multiplicado por um fator de 0,8 que procura levar em consideração a distância real de caminhada nas vias;

- Tempo de Espera Médio: metade do intervalo de cada linha, conforme informações das rotas de transporte público publicado pela SPTrans no formato GTFS em seu site;
- Tempo de Viagem em Cada Trecho: calculado como a mediana entre os tempos de viagem da linha mais frequente que passa em cada trecho, hora a hora, considerando dados de rastreamento por *GPS* da frota de ônibus da cidade em um intervalo de uma semana em agosto de 2013. O trecho aqui considerado é cada par de dois pontos de ônibus sequenciais das linhas.

Com base nesta metodologia de cálculo de oportunidades pela contagem de equipamentos, foi produzido o mapa da Figura 4, que representa este Índice de Acessibilidade de cada setor censitário da cidade de São Paulo. Neste mapa é possível verificar que os índices mais altos estão concentrados na área central da cidade (Centro e Avenida Paulista), com outras regiões de alta acessibilidade localizadas junto aos corredores de ônibus (Avenida Rebouças, zona oeste).

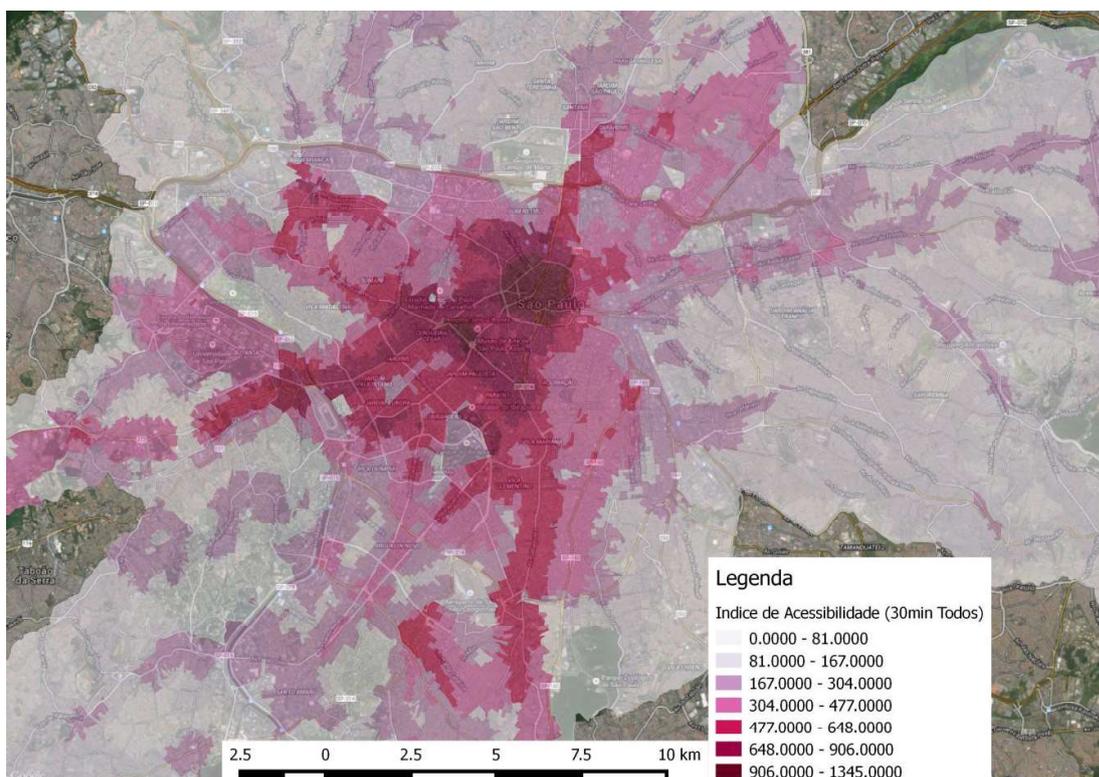


Fig. 4 - Mapa Cloroplético do Índice de Acessibilidade proposto.

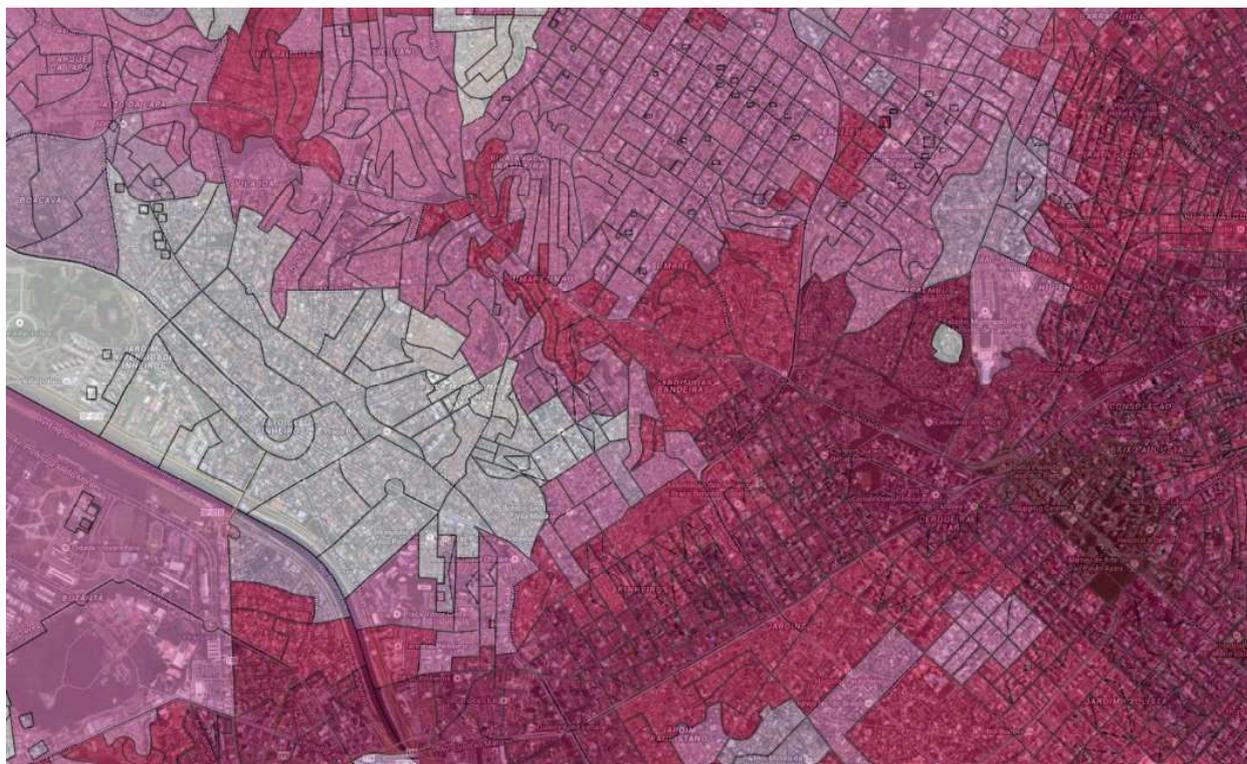


Fig. 5 - Detalhamento de desagregação espacial.

A Figura 5 mostra o detalhamento da desagregação espacial utilizada. Como foram utilizados setores censitários, é possível observar como o índice muda praticamente quadra a quadra, em função da distância aos pontos de ônibus mais próximos e da oferta heterogênea de transporte público em cada um deles.

A partir do mapeamento do Índice de Acessibilidade foi então realizada a comparação do indicador de acessibilidade com a renda e a quantidade de embarques. Para tal, o nível de agregação utilizado foi o de Zona de Tráfego, uma vez que a própria distribuição de pontos de ônibus, e, portanto, dos embarques, não seria representada homogeneamente se considerados setores censitários.

A Figura 5 mostra o detalhamento da desagregação espacial utilizada. Como foram utilizados setores censitários, é possível observar como o índice muda praticamente quadra a quadra, em função da distância aos pontos de ônibus mais próximos e da oferta heterogênea de transporte público em cada um deles.

A partir do mapeamento do Índice de Acessibilidade foi então realizada a comparação do indicador de acessibilidade com a renda e a quantidade de embarques. Para tal, o nível de agregação utilizado foi o de Zona de Tráfego,

uma vez que a própria distribuição de pontos de ônibus, e, portanto, dos embarques, não seria representada homogeneamente se considerados setores censitários.

Para a inferência do local efetivo do embarque foi aplicado um cruzamento entre os dados de *GPS* dos veículos de transporte público com os dados de bilhetagem. Para cada informação de bilhetagem, foi procurada qual a posição do respectivo veículo na base de dados de *GPS* dos ônibus através da menor diferença de tempo entre a bilhetagem e o envio do sinal pelo *GPS*. Por fim, realizou-se uma agregação de quantidade de embarques por zonas de tráfego.

Foi adotada a hipótese que os locais de moradia dos usuários de transporte público são nas respectivas zonas de tráfego onde ocorrem os embarques. Isso pode não ocorrer nas fronteiras das zonas, onde o usuário pode residir em uma zona e caminhar até o ponto de ônibus em outra zona vizinha para utilizar os serviços de transporte. Entretanto, esta hipótese é necessária para facilitar a agregação espacial.

Após o cruzamento e agregação espacial por zona de tráfego, foram filtrados apenas os primeiros embarques de cada usuário. Com os primeiros embarques apenas são evitados os problemas decorrentes de também considerar

bilhetagens de transferência. Desta forma, com os primeiros embarques apenas cada usuário será efetivamente considerado uma única vez nas análises.

Com os primeiros embarques filtrados por usuário, foi elaborado um mapa representativo da concentração de primeiros embarques ao longo de um dia útil para visualizar e analisar espacialmente a distribuição da concentração de bilhetagens no transporte na cidade. O conceito de concentração foi utilizado para evitar distorções de grandes números absolutos geradas por zonas de tráfego de grande extensão territorial. Os mapas para cada hora estão representados na Figura 9.

Na Figura 6 a concentração dos embarques por zona foi representada através de *Jenks Natural Breaks*. Pode ser observado que, principalmente logo às 4hs da manhã, existe uma concentração

bem destacada nas áreas periféricas da cidade, principalmente nas zonas do extremo leste (Itaim Paulista, Cidade Tiradentes), sul (Jardim Ângela e Grajaú) e nordeste (Brasilândia). Ao longo da manhã a concentração de embarques vai “se aproximando” das áreas centrais, com alguns destaques para zonas onde existem terminais de transportes.

Vale ressaltar que uma pequena parte das bilhetagens não representa exatamente o local de moradia pois o usuário entrou no veículo em seu ponto final por problemas de lotação excessiva no momento exato do embarque no veículo. Portanto, algumas zonas que possuem terminais de transporte refletem esse fenômeno.

Com o cálculo dos índices de acessibilidade ao nível de zona de tráfego, é possível então analisar quais são as zonas com os maiores índices na cidade.

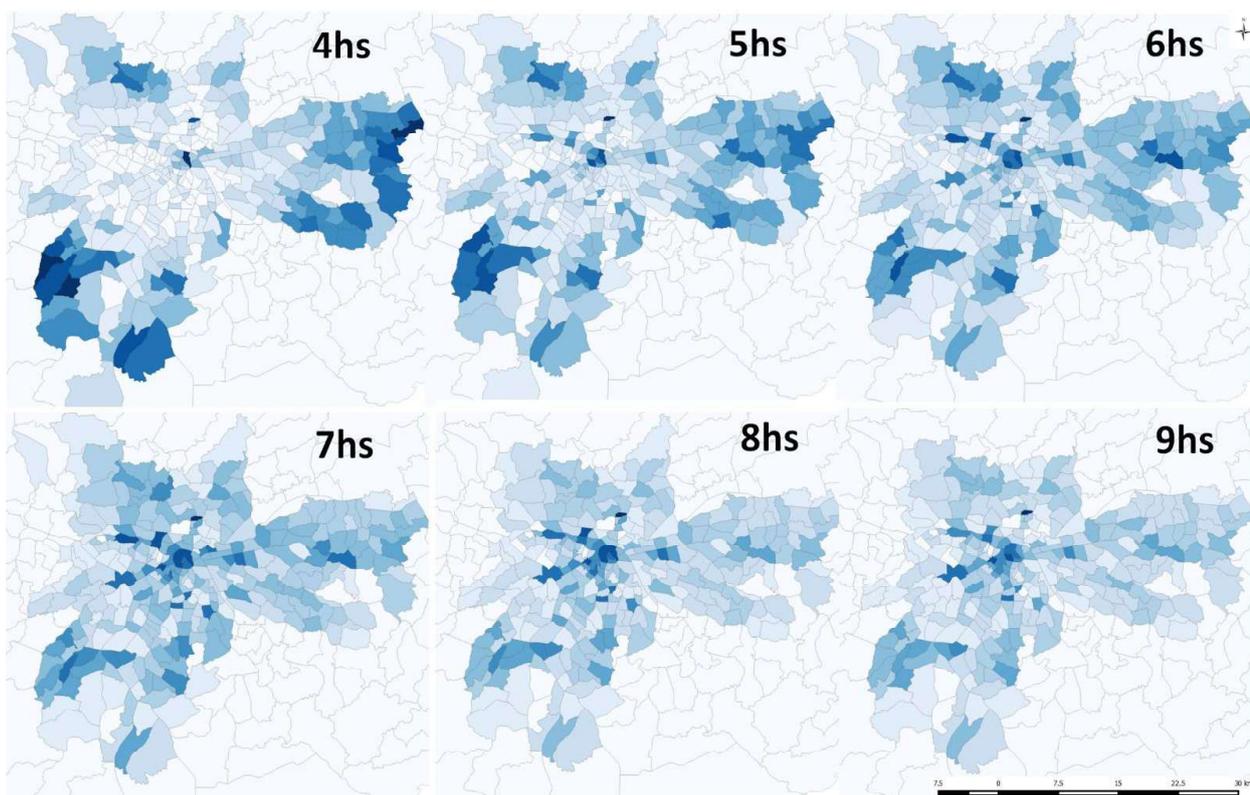


Fig. 6 - Concentração de primeiros embarques por hora de um dia útil.

A seguir as Figuras 7 e 8 e 9 indicam a auto correlação espacial para os índices de acessibilidade encontrados, para média familiar e para os primeiros embarques na cidade de São Paulo, tendo como referência as zonas relacionadas à pesquisa Origem e Destino do Metrô.

Este índice é uma medida global da autocorrelação espacial, o qual indica o grau de associação espacial presente no conjunto dos dados, a partir do produto dos desvios em relação à média. Através deste índice a hipótese nula significa independência espacial. Os valores positivos (entre 0 e + 1) indicam uma correlação

direta e negativos (entre 0 e -1) indicam correlação inversa. As indicações de Alto\_Alto, Alto\_Baixo, Baixo\_Alto e Baixo\_Baixo permitem avaliar o comportamento da variabilidade espacial através da normalização dos valores. Comparando a normalização dos valores do atributo de uma área com a média dos seus vizinhos podemos localizar estes em quadrantes.

Valores positivos com médias positivas (Alto\_Alto) e valores negativos com médias negativas (Baixo\_Baixo) indicam pontos de associação espacial positiva. Já valores positivos com médias negativas (Alto\_Baixo) e valores negativos com médias positivas (Baixo\_Alto) indicam pontos de associação espacial negativa

e estão associados a áreas de transição entre diferentes padrões espaciais (DRUCK et al, 2004).

Em relação aos primeiros embarques ressalta-se a diferença entre os índices para o horário das 4:00 horas (IMoran=0,128709) e para o horário das 9:00 horas (IMoran=0,065251). Nota-se que para o horário das 4:00 horas a correlação espacial é maior devido a uma concentração dos primeiros embarques localizados nas áreas mais extremas da Zona Leste e na Zona Sul. Quando observamos o horário das 9:00 horas percebemos um maior espalhamento dessa correlação, indicando uma maior dispersão.

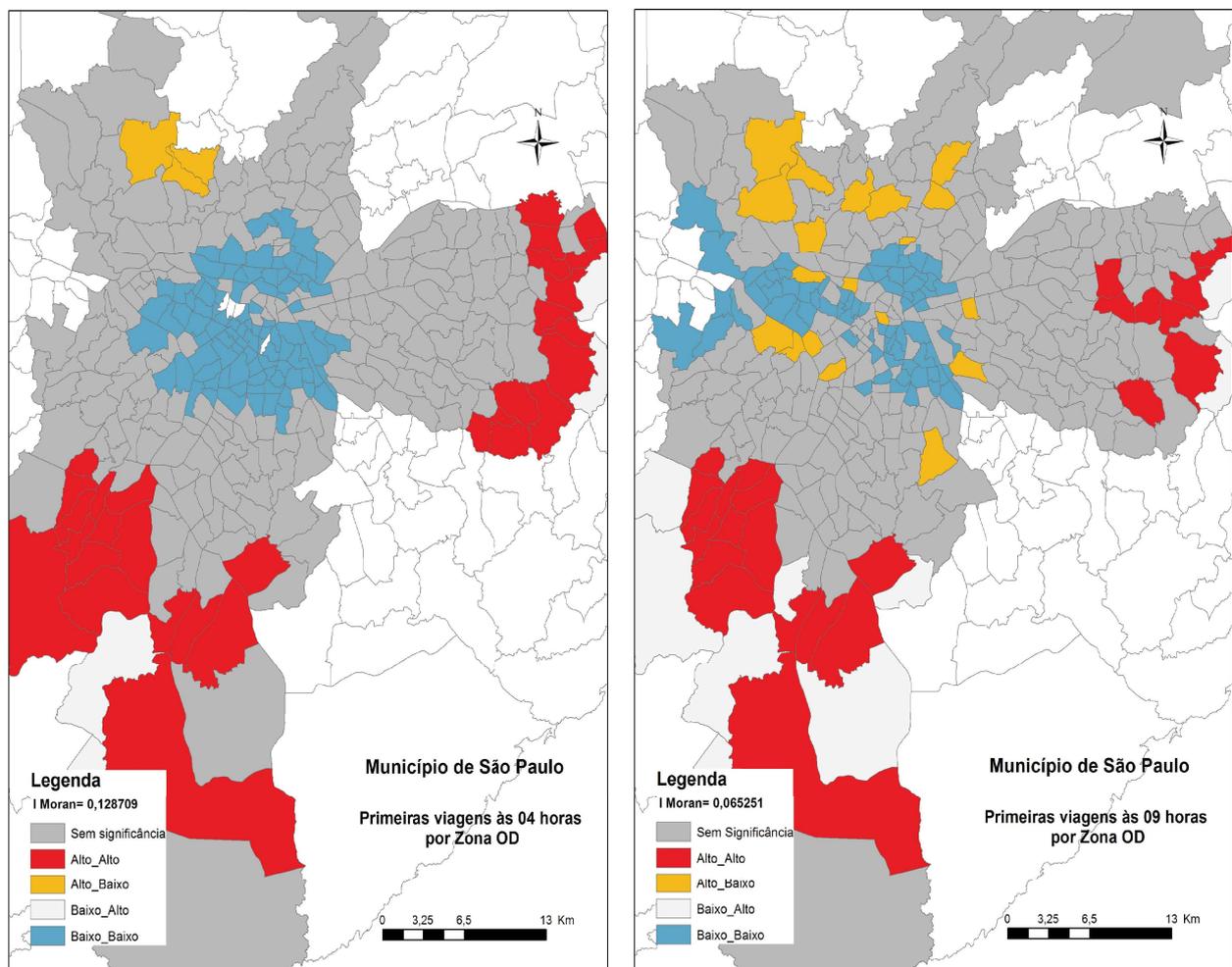


Fig. 7 - Índice de Moran de primeiros embarques de 4 e 9 horas.

Quando analisamos a aplicação do índice de Moran para o número de equipamentos acessados por setor censitário (IMoran = 0,888237) e através das Zonas OD (IMoran=0,655494), verifica-se que a perda de autocorrelação espacial

para os dados agregados não foi significativo e não mostrou grande alteração na representação. Nesse sentido, a utilização da Zona OD como referência para os dados de equipamentos acessíveis é conveniente.

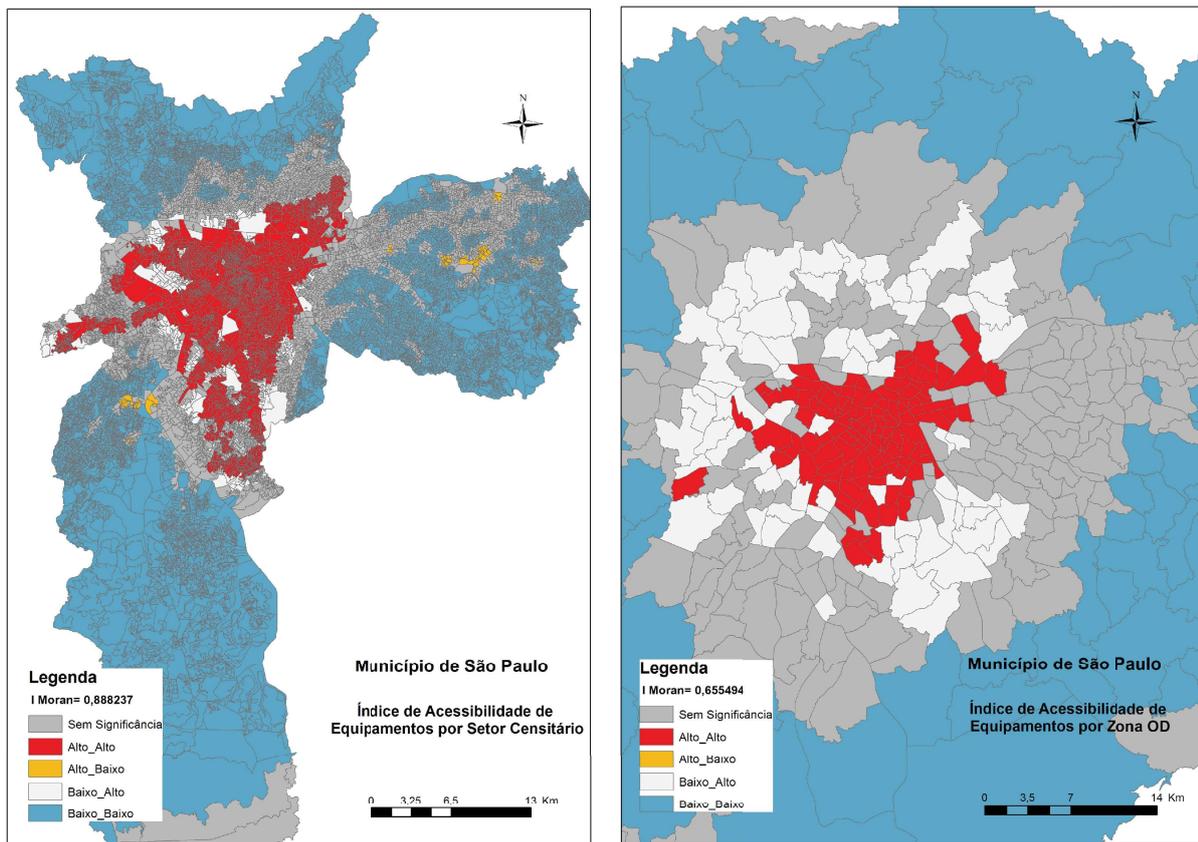


Fig. 8 - Índice de Moran com relação aos Índices de Acessibilidade para setores censitários e zonas OD.

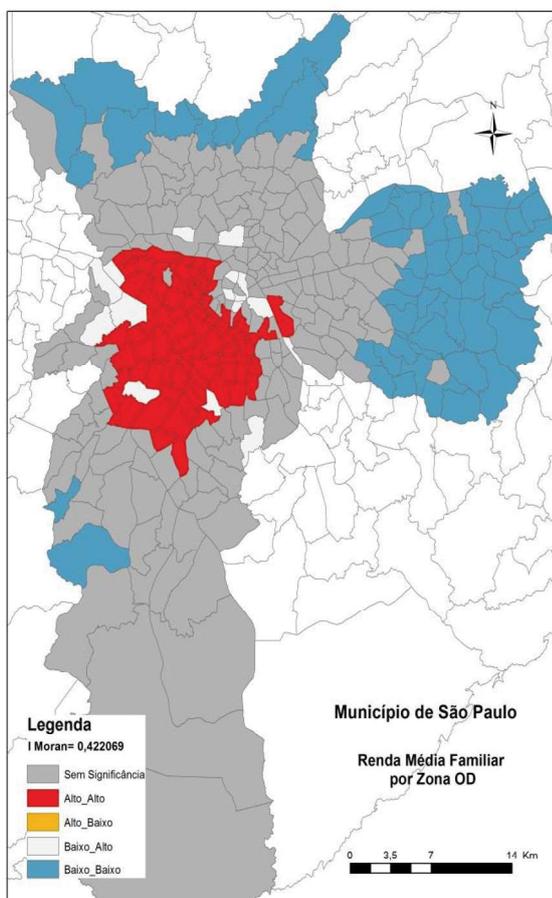


Fig. 9 - Índice de Moran para a variável de renda média familiar por zona OD.

Acima observamos o mapa representado a autocorrelação da renda média familiar por Zona OD. O índice relacionado a renda ( $I_{Moran} = 0,422069$ ) apresenta um valor auto e indica através do mapa acima associações espaciais positivas na área central do município e na Zona Leste, caracterizando a disparidade de renda entre estas regiões.

Para a análise socioeconômica da acessibilidade foi utilizada a variável Renda Média Familiar disponibilizada pela Pesquisa de Origem Destino do Metrô SP de 2007. O gráfico gerado representa tanto a quantidade de bilhetagens por zona, o Índice de Acessibilidade e a Renda Média Familiar (Figura 11). No gráfico, o eixo  $x$  representa a acessibilidade da zona (expressa em % de equipamentos na cidade acessíveis em 30 minutos às 8hs da manhã de um dia útil), o eixo  $y$  a Renda Média Familiar, e o tamanho da bolha é a quantidade de primeiros embarques registrados em cada zona de tráfego.

Ao todo as bolhas representam 3.073.281 bilhetes de transporte. Estão descritos os nomes de algumas zonas para esclarecimento da análise do gráfico.

- *Cidade Tiradentes (região periférica da zona leste)*: baixa renda familiar, baixa acessibilidade e alto número de embarques;
- *Pacaembu (zona centro-oeste)*: alta renda familiar, média acessibilidade e poucos embarques.
- *Trianon (Avenida Paulista)*: alta acessibilidade, alta renda média e poucos embarques.
- *Sé e Anhangabaú (centro da cidade)*: alta acessibilidade, baixa renda média da população e grande quantidade de embarques.

É possível observar que existe uma grande quantidade de zonas que possuem grande quantidade de embarques, baixa renda em conjunto com baixa acessibilidade. Destaca-se que o recorte apenas das zonas com renda menor que R\$3 mil reais e acessibilidade menor que 7% dos equipamentos da cidade representam 70% de todos os usuários (2.142.921), portanto, a maior parte da população que usa ônibus como seu meio de locomoção possui baixa renda e está submetida a tempos de viagem muito maiores que 30 minutos para acessar equipamentos urbanos.

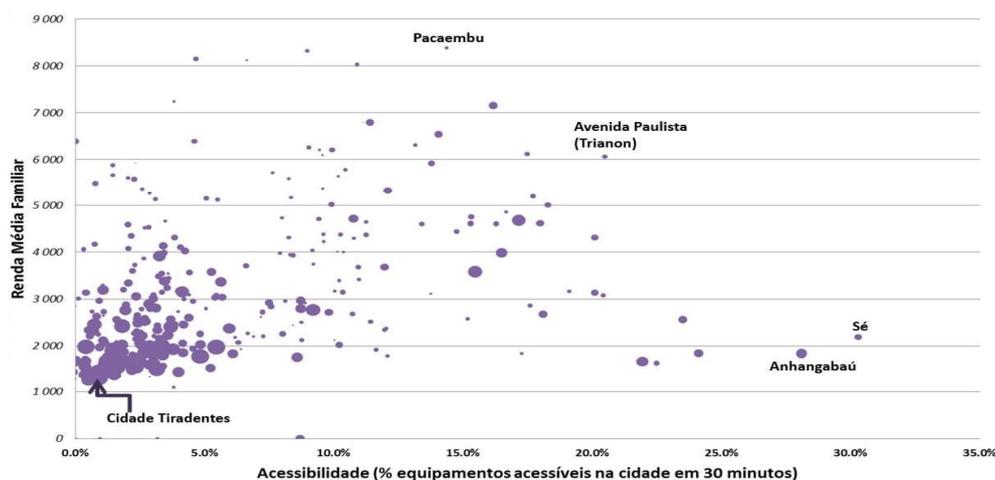


Fig. 10 - Gráfico representando a quantidade de 1<sup>as</sup> Bilhetagens em um dia útil, Índice de Acessibilidade e Renda Média Familiar.

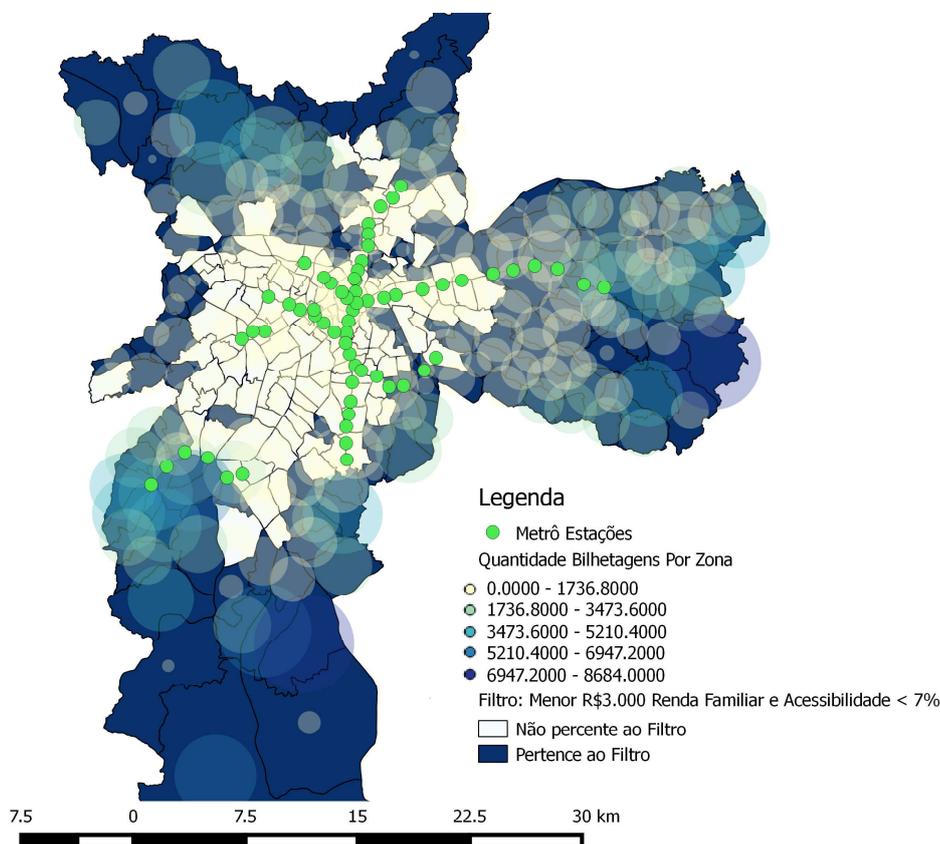


Fig. 11 - Mapa destacando espacialmente o recorte de renda < R\$ 3 mil e acessibilidade < 7%.

Representando espacialmente este recorte (renda < R\$ 3 mil e acessibilidade < 7%) fica ainda mais notório a baixa acessibilidade (tempos de viagem maiores) das áreas mais periféricas da cidade de São Paulo, como representado na Figura 11.

No mapa, as zonas que representam o recorte estão destacadas em azul escuro. Nota-se claramente que as áreas periféricas são aquelas representadas no corte de baixa renda e acessibilidade aos equipamentos da cidade. Nas áreas centrais, em branco, estão apenas 30% dos usuários do transporte público por ônibus em São Paulo. As estações do metrô estão representadas com pontos verdes, mostrando como o metrô valoriza regiões (exemplo com o que ocorre na zona norte).

As bilhetagens por zona também estão representadas no mapa com círculos em cada centroide de zona, mostrando a quantidade de bilhetagens. Nas zonas das áreas centrais que não pertencem ao recorte aplicado, apenas a primeira categoria da classificação por natural breaks está presente.

Para finalizar as análises, foi utilizada a

técnica de *Self Organizing Maps (SOM)* para compreender melhor os tipos diferentes de zonas em função das três variáveis analisadas (acessibilidade, renda e bilhetagens observadas) através do agrupamento (*clustering*) gerado pelo método. O *SOM* é uma ferramenta poderosa para visualizar e analisar dados multidimensionais devido a sua versatilidade em converter estatísticas não lineares complexas em relações geométricas mais simples em uma visualização, sendo inclusive já utilizada em diversos campos (KOHONEN, 2001). Na Figura 12 estão representadas as visualizações em ambiente *SOM* gerado para os dados de acessibilidade, renda e bilhetagens das zonas. Da esquerda para a direita, estão representados: visualização por variável utilizada (renda à esquerda, quantidade de equipamentos à direita e concentração de embarques em cada zona abaixo), agrupamentos gerados com código de cores (meio) e a *Unified distance matrix (U-Matrix)* à direita. Abaixo estão os toróides com as contribuições cada variável utilizada para o mapa auto-organizado.

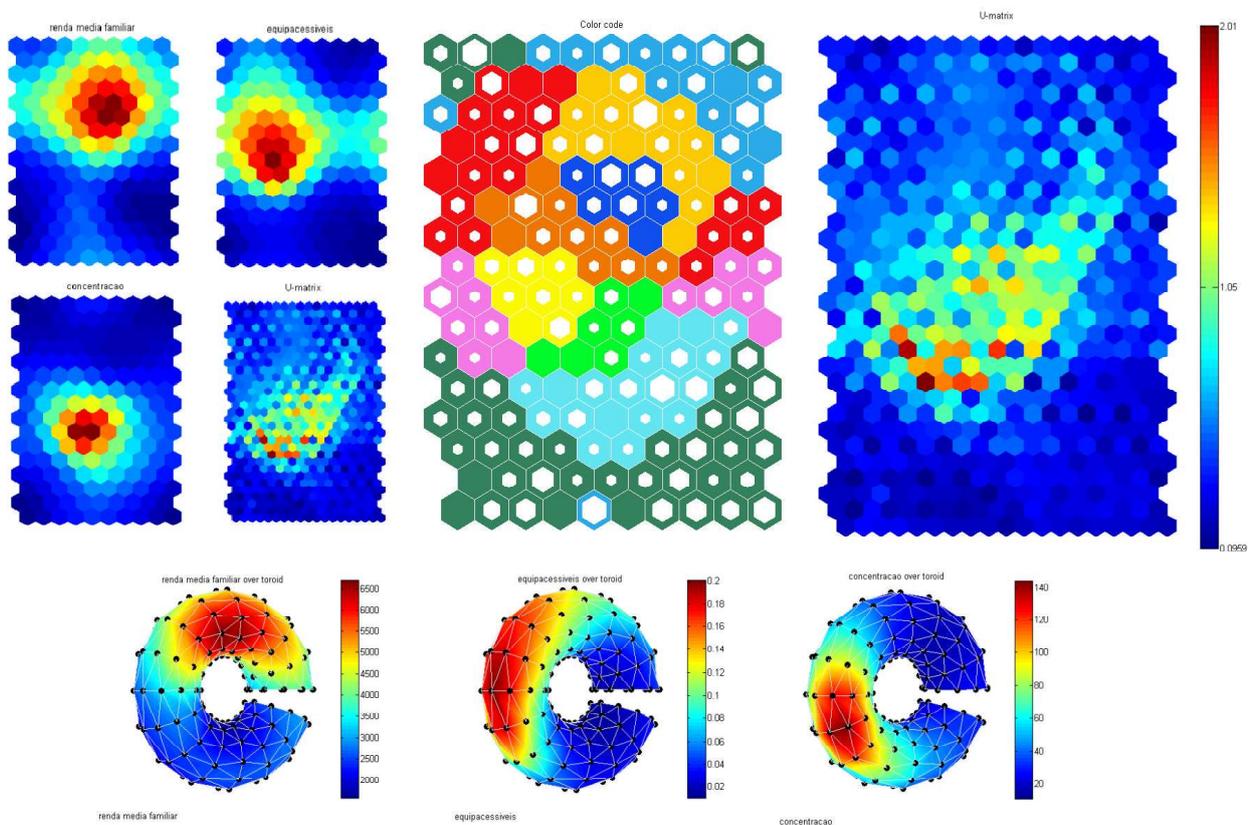


Fig. 12 -Visualizações e elementos do SOM gerado.

Os agrupamentos (clusters) gerados pelo SOM no meio da Figura 12 representam as similares encontradas entre diferentes zonas com relação às três variáveis analisadas. Através de sua espacialização e análise dos valores que cada uma abrange foi possível compreender o que significam os 10 clusters gerados, conforme Figura 13:

- Cluster 1 (amarelo): renda média, alta concentração de embarques e acessibilidade (área central e área comercial de Pinheiros). São as Centralidades acessíveis. Ex. Sé.
- Cluster 2 (azul escuro): alta renda, acessibilidade média, baixo número de embarques. População de alta renda em regiões acessíveis. Ex. Pacaembu, Pompéia, Moema.
- Cluster 3 (verde claro): média renda e acessibilidade, alta concentração de embarques. Parece estar relacionado às zonas com terminais de transporte. Ex. Lapa, Tatuapé, Santana.
- Cluster 4 (vermelho): valores médios para as três variáveis. Equilíbrio, alguns bairros no centro expandido.
- Cluster 5 (azul claro): média renda e

acessibilidade, mais embarques que a média. Bairros já na fronteira do centro expandido com as áreas periféricas.

- Cluster 6 (laranja): alta renda, baixa acessibilidade e relativamente poucos embarques. População de alta renda em áreas mais inacessíveis.
- Cluster 7 (rosa): valores equilibrados mas com renda menor. Predomina zonas próximas à área central, mas com baixa renda. Ex. Pari e Brás.
- Cluster 8 (verde escuro): com 43 zonas neste Cluster, é o mais representativo, representam as áreas periféricas com baixa renda, baixa acessibilidade e grande concentração de embarques nos transportes públicos. Ex. Cidade Tiradentes, Brasilândia, Grajaú.
- Cluster 9 (azul médio): média renda, baixa acessibilidade e baixo uso de transporte público. São bairros não tão distantes das áreas centrais, com baixa densidade. Ex. Alto da Mooca, Alto de Santana, Parque dos Príncipes (zona Oeste).
- Cluster 10 (laranja escuro): alta renda, alta acessibilidade e alto uso do transporte público. Áreas como Pinheiros, Paulista, Higienópolis e Vila Clementino.

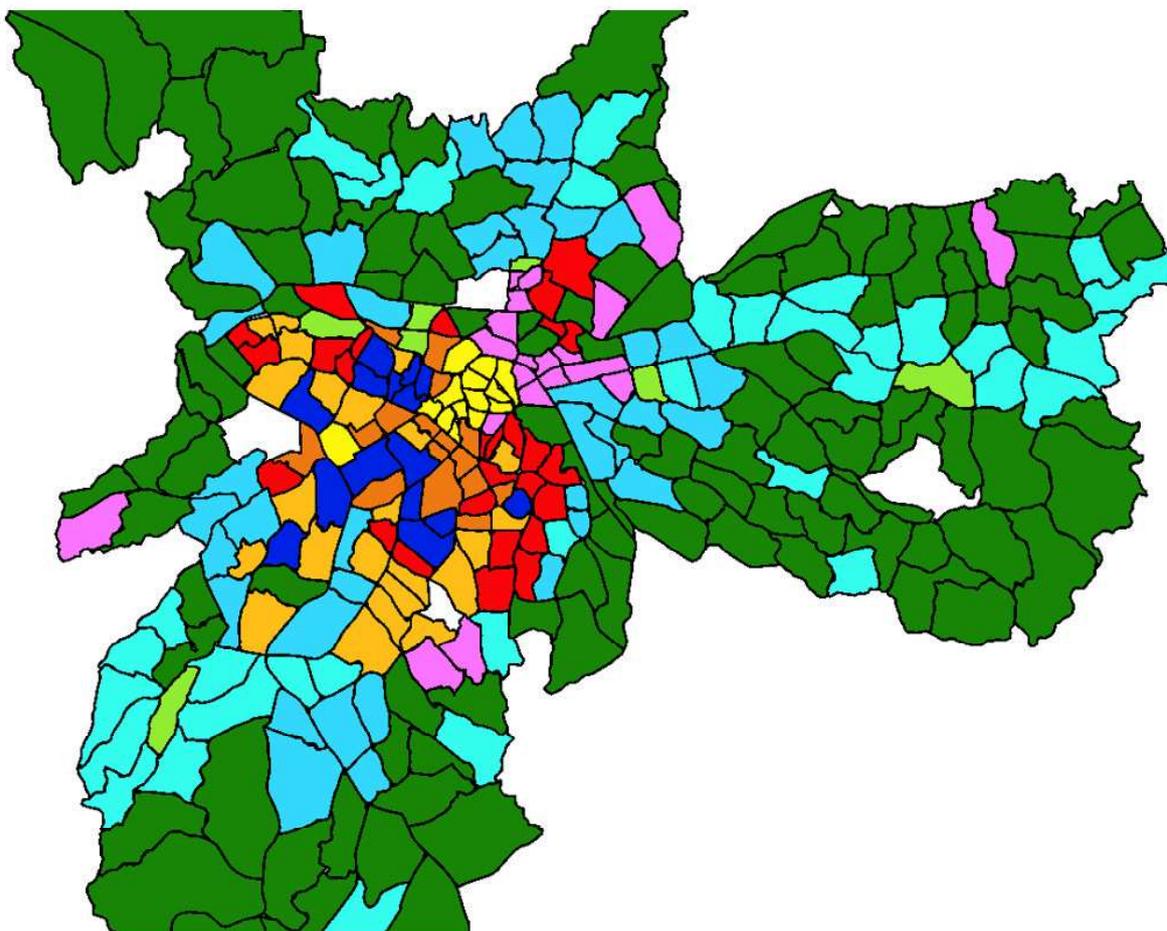


Fig. 13 - Clusters obtidos através do SOM, espacializados

## 5. CONCLUSÃO

A avaliação da distribuição espacial da acessibilidade na cidade de São Paulo foi investigada através da correlação da acessibilidade a equipamentos, quantidades de embarques e renda média dos usuários. Foi criado um Índice de Acessibilidade que representa a quantidade de equipamentos urbanos acessíveis em 30 minutos. Desta forma tornou-se possível avaliar a segregação espacial uma vez agregadas as informações de renda e a espacialização das zonas onde ocorre o primeiro embarque.

Da primeira etapa do trabalho foi possível concluir que existe uma concentração de equipamentos urbanos nas áreas centrais da cidade. Esta concentração é bem evidente por as categorias de Lazer e Compras, enquanto muito mais espalhada no caso de Saúde e Educação. A acessibilidade a estes equipamentos, considerando um intervalo de tempo disponível de 30 minutos, é distribuída de forma não homogênea na cidade. Maiores acessibilidades são encontradas nas áreas comerciais centrais, imediatamente próximos aos principais corredores de ônibus e nas áreas residenciais onde existe uma maior oferta de linhas e maiores da Consolação parecem ser cruzamentos de muitas linhas com alta frequência e, portanto, lugares que fornecem uma maior acessibilidade. Pelo contrário, fora das grandes avenidas, o tempo de 30 minutos não parece suficiente para alcançar a maioria dos equipamentos, prejudicando as possibilidades de interação dos moradores dessas áreas mal servidas.

Além desta carência de oportunidades, o mapeamento dos locais em que ocorre o primeiro embarque continua mostrando claramente os efeitos desta segregação espacial. Os moradores mais afastados do centro precisam se submeter a tempos de viagem maiores que 30 minutos para acessar seus destinos finais, assim como iniciar suas viagens em horários muito cedo, como 4h e 5h da manhã de um dia útil. Daí resulta que na periferia os altos tempos de viagem às áreas com equipamentos somam-se aos poucos equipamentos em seus arredores.

Analisando conjuntamente renda, oferta de transporte público e bilhetagens observou-se que os moradores da periferia possuem baixa renda e baixa acessibilidade. Simultaneamente,

os mesmos habitantes constituem o 70% da totalidade das bilhetagens analisadas. Daqui resulta que o serviço de ônibus é o principal meio de transporte usado pelas pessoas com baixa renda, que vivem nos subúrbios e que acordam muito cedo de manhã para atravessar a cidade. Não conhecendo o tempo de chegada ao destino destas pessoas, a pesquisa não é capaz de determinar a duração da viagem e, por conseguinte, avaliar a eficiência do meio de transporte utilizado. Ainda podem ser consideradas verdadeiras as duas hipóteses para as quais uma grande quantidade de pessoas que vivem em São Paulo é empregada em trabalhos que começam mais cedo do que ao nascer do sol ou ela perde muito tempo de sua vida no transporte para cobrir a distância entre sua casa e seu emprego.

A aplicação da técnica SOM também permitiu um agrupamento de zonas de tráfego com características semelhantes de renda, uso do sistema de transporte público e acessibilidade, permitindo encontrar as disparidades e comprovar uma distribuição espacial heterogênea entre as variáveis. Desta forma, é possível destacar as principais áreas da cidade que merecem mais atenção do poder público para a melhoria de acessibilidade a serviços e para a qualidade do transporte público, priorizando atuar exatamente para a população que mais a necessita.

## 6. PESQUISAS FUTURAS

O tema de acessibilidade, transporte público, e análise espacial de dados de bilhetagens e GPS é extenso e permite várias análises específicas para melhor compreensão das dinâmicas urbanas de transporte. Analisar também a acessibilidade promovida pelo automóvel em comparação com o oferecido pelo transporte público pode trazer conclusões ainda mais interessantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARAT, J.; BATISTA M. S. N. Transporte público e programas habitacionais. **Pesquisa e Planejamento econômico**, 3, p.375-388, 1973
- CARRERA, L. **Tracing accessibility over time: two swiss case studies**. Tese Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 2002.
- DÉAK, C; SCHIFFER, S. R. **O processo de**

- urbanização no Brasil.** São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1999.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M. S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Spatial analysis of geographic data.** Embrapa Cerrados, 2004.
- FURTADO, C. **Desenvolvimento e subdesenvolvimento.** Rio de Janeiro, Contraponto: Centro Internacional Celso Furtado, 2009.
- GEURS, K.; VAN ECK, J. **Accessibility measures: review and applications.** Bilthoven, National Institute of Public Health and the Environment, 2001. 265p.
- HANSEN, W. G. How accessibility shapes land use. **Journal of the American Institute of Planners**, v. 25, n. 2, p. 73-76, 1959.
- INGRAM, D. The concept of Accessibility: a search for an operational form. **Regional Studies**, v. 5, n.2, p. 101-107, 1971.
- LANGENBUCH, J. R. **A estruturação da grande São Paulo: estudo de geografia urbana.** Rio de Janeiro, Fundação IBGE, 1971. 527p.
- MARICATO, E. **Metrópole na periferia do capitalismo.** São Paulo, Hucitec, 1996. 71p.
- MARICATO, E. Metrópole, legislação e desigualdade. **Estudos Avançados**, v.17, n.48, p.151-166, 2003.
- MEYER, R. M. P.; GROSTEIN, M. D.; BIDERMAN, C. **São Paulo metrópole.** São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2004.
- KOHONEN, T. **Self-organizing maps** (3rd ed.). Berlin, Springer-Verlag, 2001. 502p.
- OWEN A.; LEVINSON D. **Access Across America: Transit 2014 Methodology. Final Report.** Accessibility Observatory. Center for Transportation Studies. Department of Civil, Environmental and Geo- Engineering. University of Minnesota, 2014. 14p.
- PÁEZ, A.; SCOTT, D.; M.; MORENCY, C. Measuring accessibility: positive and normative implementations of various accessibility indicators. **Journal of Transport Geography**, v. 25, p. 141-153, 2012
- PINELLI, F. HOU, A.; CALABRESE, F.; NANNI, M.; ZEGRAS, C. & RATTI, C. Space and time-dependant bus accessibility: a case study in Rome. In: ITSC'09. 12th International IEEE Conference Intelligent of Transportation Systems, St. Louis, MO, USA, 2009. **Anais. Intelligent Transportation Systems**, 1-6, 2009.
- CORRÊA, F; RAIJA JR, A, A. Desenvolvimento de Modelos de Viagens Urbanas com Uso de Redes Neurais Artificiais. In: **XX ANPET** (Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes). Brasília, 2006. 4p.
- SALONEN, M.; TUULI, T. Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport. **Journal of Transport Geography**, v. 31, p. 143-153, 2013
- SANTOS, M. **Metrópole corporativa fragmentada. O caso de São Paulo.** São Paulo, Nobel, 1990. 136p.
- VASCONCELLOS, E. A. **O que é trânsito.** São Paulo, Editora Brasiliense, 1998. 92p.
- VASCONCELLOS, E. **Circular é preciso, viver não é preciso: a história do trânsito na cidade de São Paulo.** São Paulo, Annablume, 1999. 289p.
- VASCONCELLOS, E. **Transporte urbano, espaço e equidade – Análise das políticas públicas.** São Paulo, Annablume, 2001. 205p.
- VIEIRA, R. S.; HADDAD, E. A. Índice De Acessibilidade Para São Paulo. In: XL Encontro Nacional de Economia. ANPEC-Associação Nacional dos Centros de Pós-graduação em Economia. **Anais**. 167, 2014.
- VILLAÇA, F. **Espaço intra-urbano no Brasil.** São Paulo, Studio Nobel, 2001. 373p.
- VICKERMAN, R. W. Accessibility, attraction, and potential: a review of some concepts and their use in determining mobility. **Environment and Planning A**, v. 6, n. 6, p. 675 – 691, 1974.