

## Indicadores de floresta urbana a partir de imagens aéreas multiespectrais de alta resolução

### Urban forest indicators through high-resolution multispectral images

Demóstenes Ferreira da Silva Filho  
Kathia Fernandes Lopes Pivetta  
Hilton Thadeu Zarate do Couto  
Jefferson Lordello Polizel

---

**RESUMO:** O presente trabalho avaliou o uso de imagens aéreas multiespectrais de alta resolução para a obtenção de dados sobre a qualidade do desenho urbano e sua floresta urbana em nove bairros da cidade de Piracicaba, SP. Foram feitas classificações supervisionadas para caracterização de alvos intra-urbanos e as proporções obtidas como solo exposto, copa das árvores, gramados, asfalto e telhados, foram estudadas para a mensuração da floresta urbana em cada localidade. Estas variáveis foram relacionadas entre si e com as variáveis independentes: densidade populacional, pessoas com mais de quinze anos de estudo e chefes de família com renda acima de vinte salários mínimos, obtidos por meio de censo da população. Por meio da análise de regressão linear, foram identificadas variáveis para avaliação das áreas intra-urbanas. Foram feitas correlações e regressões lineares entre os dados obtidos da imagem e entre os indicadores propostos. Obtiveram-se correlações negativas entre densidade populacional e cobertura arbórea e os índices avaliados, mostrando semelhanças com o preconizado em literatura. São propostos indicadores compostos entre os quais: a proporção entre espaço arborizado sobre espaço impermeabilizado (PAI) e a proporção entre espaço arborizado sobre espaço construído (PAC). Conclui-se pela possibilidade de utilização desses indicadores para avaliação da floresta urbana e definição de prioridades na execução de políticas voltadas para a melhoria da arborização urbana, priorizando-se a aplicação de recursos nos bairros mais carentes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Arborização urbana, Índices de floresta urbana, Imagens multiespectrais de alta resolução

**ABSTRACT:** The present work evaluated urban forest indicators, acquired through airborne high-resolution multispectral images, on the quality of the urban design and its vegetative fraction, in special its trees, in nine neighborhoods of Piracicaba, SP. There were made supervised classifications for characterization of intra-urban elements and the proportions obtained, as exposed soil, tree cover, lawns, asphalt, concrete pavements and roofs. They were studied for the measurement of the urban forest in each place. These variables were related to each other, as well as with the independent variables: population density, people with more than fifteen years of study and family heads with income above twenty minimum wages, obtained through population census. Through the analysis of linear regression variables were identified for intra-urban areas evaluation. Correlations were made and linear regressions among the data obtained from the image and among the proposed indicators. Negative correlations were obtained among population density and arboreal covering and the evaluated indices, in accordance with the predicted in the literature. Composite indicators are proposed, as: the proportion between arboreous space on waterproof space (PAW) and the proportion between arboreous space on building space (PAB). It is concluded by the possibility of the use of those indicators for evaluation of the urban forest and definition of priorities in the execution of ordinances to the improvement of the urban forestry, being prioritized the application of resources in the most lacking neighborhoods.

**KEYWORDS:** Urban trees, Urban forest indices, High-resolution multispectral videography images

## INTRODUÇÃO

No Brasil, mais de 87% da população vive organizada em áreas urbanas. Com o surgimento dos grandes aglomerados humanos organizados em estruturas urbanas e o advento da revolução industrial, geralmente e de maneira crescente, as cidades apresentam estruturas e elementos que substituem os elementos naturais, como asfalto, edificações, pisos de concreto, telhas de cerâmica, amianto, vidros e estruturas metálicas. Esses elementos, com elevada capacidade refletora, condicionam um microclima seco e quente, ampliando o desconforto da população pela alteração do balanço de energia e, formando bolsões denominados de “ilhas de calor”, aumentam a predisposição para inundações, além de proporcionarem compactação e impermeabilização do solo.

A preocupação com os aspectos ambientais urbanos é crescente e as soluções passam por apreciações complexas e multidisciplinares, pois envolvem informações diversas e muitas vezes difíceis de serem obtidas em levantamentos de campo, devido à morosidade para obtenção das informações sobre um bairro ou sobre uma cidade inteira.

Uma das soluções para amenizar os problemas causados pela excessiva impermeabilização do solo por materiais que elevam a amplitude térmica das cidades é tratar o meio urbano com vegetação, em especial seu componente arbóreo, por meio da arborização de vias públicas, praças, áreas de preservação, como margens de cursos d'água e áreas íngremes (Baker et al., 2003).

As árvores são como bombas de água autorreguláveis, pois abrem seus estômatos quando existe disponibilidade de água e calor, refrescando o meio pela evapotranspiração das partículas de água, e fecham quando situações adversas ocorrem, preservando condições favoráveis e condicionando o clima urbano, diminuindo a amplitude térmica, adequando a cidade dentro da faixa de conforto térmico humano que, de acordo com Miller (1997), está em torno de 25°C.

Segundo Milano e Dalcin (2000), existem aspectos positivos das árvores nas cidades, os quais podem ser mensurados, avaliados e monitorados, caracterizando benefícios e, conseqüentemente, objetivos que passam a ser estabelecidos no planejamento: estabilização e melhoria microclimática; redução da poluição atmosférica;

diminuição da poluição sonora; melhoria estética das cidades; ação sobre a saúde humana; benefícios sociais, econômicos e políticos.

Segundo Macedo (1995), o espaço livre de edificação, como elemento de projeto é praticamente desconhecido pelos profissionais e pela população, que o vêem como um espaço residual a ser ajardinado ou simplesmente deixado de lado.

Atualmente, existe uma ausência de padrões e critérios para avaliação das áreas verdes urbanas, devido à dificuldade de mensurar e de estabelecer proporções entre as mais diversas áreas verdes, tanto públicas como privadas, sua distribuição nas cidades, e a comunidade humana e suas diferentes maneiras de ocupar e usar o espaço.

As caracterizações da vegetação e das áreas verdes urbanas são onerosas tanto pelo tempo que demandam como pelo custo envolvido, trazendo a necessidade do desenvolvimento de alternativas viáveis.

No Brasil, algumas cidades possuem levantamentos sobre as condições e disponibilidade de áreas verdes e arborização urbanas. Na maioria das vezes esses dados são obtidos, por amostragem e referem-se somente ao tema pesquisado, áreas verdes ou arborização, sem confrontações amplas e desejáveis com as demais estruturas e elementos constituintes da área urbana como edificações, tipos de pavimento, solo e demais elementos.

Além disso, as áreas urbanas são espaços dinâmicos, pois casas são construídas, outras são demolidas, árvores são suprimidas, outras são plantadas, prédios são erguidos, tudo isso em questão de meses e não existem trabalhos que avaliem essas condições de maneira abrangente em curto espaço de tempo para que se possa intervir, mediante políticas públicas, para manter ou ampliar a arborização visando a uma melhor qualidade de vida.

Paes et al. (2003) estudaram a obtenção de índices de qualidade de vida do espaço urbano por meio de classificação digital de imagens do satélite IKONOS. Utilizaram nos índices a cobertura verde em doze bairros da cidade de São José dos Campos, SP, com resultados que indicam sua utilização para avaliação da qualidade de vida nesses espaços.

Akbari et al. (2003) utilizaram fotografias aéreas digitais de alta resolução para caracterizar o ambiente urbano com especial atenção para espaços impermeabilizados e possibilidades para novos plantios de árvores, objetivando a diminuição da poluição e tratamento de ilhas de calor nas cidades.

Uma outra resposta a esta necessidade pode ser a utilização de sistemas de sensoriamento remoto de baixa altitude, em nível suborbital, com sensores montados em aeronaves. Um desses sistemas é conhecido como videografia e é composto de uma ou mais câmeras de vídeo acopladas ao piso de uma aeronave, de maneira a obter imagens paralelas ao solo em tempo real, tanto na faixa do visível (400 a 700 nm) quanto na do infravermelho próximo (700 até 1100 nm) quando com câmeras multiespectrais.

Segundo Moreira (2003), a videografia é uma técnica que permite o levantamento de um grande volume de informações de alta resolução, em curto espaço de tempo e a baixo custo. Destaca ainda sua larga utilização nos Estados Unidos da América e pouco desenvolvimento no Brasil. Onde, começou em 1997, em Manaus, com objetivo de verificar a capacidade de obtenção de dados biofísicos da floresta e calibrar dados orbitais.

Além de Manaus, na mesma época, a videografia teve início com estudos elaborados em Piracicaba para pesquisas voltadas à agricultura de precisão e aplicações florestais (Couto et al., 2000).

Em áreas urbanas não existem trabalhos no Brasil utilizando videografia e poucos trabalhos foram desenvolvidos em outros países, especialmente relacionados com áreas verdes e silvicultura urbana.

No Brasil, recentes pesquisas foram desenvolvidas com avaliação do estado nutricional de florestas plantadas utilizando videografia multiespectral Pomper Mayer Neto (2002) e Pomper Mayer Neto e Couto (2003).

Sacamano et al. (1995) desenvolveram testes entre diversos tipos de fotografias aéreas e imagens de videografia analógicas e digitais, em termos de definição, para a localidade de Oak Park, Illinois. Custo da imagem e implicações da integração com sistemas de informação geográfica (SIG) foram também considerados. A intenção foi identificar os meios mais econômicos e precisos para descrever a cobertura da floresta urbana. Os resultados obtidos mostraram que a fotografia colorida infravermelha obteve os melhores valores de exatidão na mensuração da vegetação urbana

e áreas potenciais para plantio de árvores. A segunda posição foi para a videografia digital que ainda confundiu gramados com áreas arborizadas, tornando difícil a mensuração de espaços potenciais para plantio de árvores. Economicamente as fotografias em preto e branco foram as que apresentaram os custos mais baixos.

Acredita-se poder mensurar a cobertura arbórea das cidades, a floresta urbana, e avaliar o tecido urbano composto por outros sistemas como o viário, edificações, pavimentações e demais tipos de coberturas urbanas. Além disso, considera-se a obtenção de indicadores para definição de prioridades de intervenção para a ampliação da cobertura arbórea urbana.

O objetivo deste trabalho é avaliar a qualidade do desenho urbano e da floresta urbana por meio de dados das imagens de videografia aérea multiespectral, em nove bairros da cidade de Piracicaba, SP.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização geográfica e clima do município

Segundo IBGE (2002) o Município de Piracicaba situa-se entre as coordenadas geográficas 22°42' de latitude Sul e 47°38' de longitude Oeste de Greenwich. Dista, em linha reta da capital do Estado, São Paulo, 138 Km e está a 540 m de altitude.

O clima, pela classificação de Koeppen é Cwa, isto é, subtropical úmido com estiagem no inverno, com a temperatura média, do mês mais quente, superior a 22°C, e a do mês mais frio, inferior a 18°C.

### Descrição do método

#### Videografia aérea

Como método de trabalho, executou-se, a coleta de dados, por meio de videografia aérea de alvos intra-urbanos correspondentes a nove cenas, com aproximadamente 570 m x 421 m cada uma referente a um bairro da cidade de Piracicaba, SP. Os bairros videografados foram Areião, Centro, Cidade Alta, Cidade Jardim, Clube de Campo, Jardim Monumento, Nova Piracicaba, São Dimas e Vila Rezende.

Para montagem do sistema foi utilizada uma câmera digital multiespectral, devido à maior resolução espacial e espectral, além da maior operacionalidade em relação a câmeras SVHS, pois as imagens são gravadas em computador assim que obtidas.

A câmera empregada foi a DUNCAN TECH modelo MS 3100, colorida, com resolução de imagem de 1384 x 1036 pixels, apta para capturar imagens na faixa do espectro visível e do infravermelho próximo (400-1100 nm) (Duncan, 2000).

Para a fixação do equipamento, foi usado um suporte em uma abertura no piso de um avião CESSNA, modelo 180. É indicado o avião porque ele se alinha horizontalmente em relação ao solo quando em sobrevôo, o que foi necessário para a obtenção das imagens verticais dos alvos. Os sobrevôos sobre a cidade de Piracicaba foram realizados em dias sem nuvens e com boa visibilidade, dias 15 e 17 de maio de 2003, entre 10h40 e 12h.

Foi utilizada como base a pista do aeroclube de Piracicaba. Nela, foram efetuadas a calibração final da câmera e a montagem dos equipamentos.

A câmera foi ligada a um monitor, que exibia o alvo filmado no instante da passagem, possibilitando com isto a detecção e correção de problemas com a rota do avião ou regulação dos equipamentos.

As imagens da cidade foram digitalizadas para computador assim que obtidas, em tempo real, por meio de placa instalada no computador.

### **Correção geométrica das imagens**

Para o georreferenciamento e correção geométrica das imagens foram coletadas as coordenadas de pontos de apoio no terreno, por meio de um receptor GPS topográfico, marca Trimble, modelo ProXR. Os dados coletados foram corrigidos diferencialmente, em pós-processamento, pelos dados de uma estação base de mesma marca, localizada na Universidade de São Paulo, Campus de Piracicaba, pertencente ao CIAGRI -Centro de Informática do Campus "Luiz de Queiroz".

Para o georreferenciamento e correção geométrica das imagens foram inseridas coordenadas geográficas obtidas do GPS e, em seguida, procedeu-se à escolha das melhores cenas, buscando-se a abrangência do espaço intra-urbano de cada bairro.

### **Tratamento das imagens**

Análises de pixel foram elaboradas para determinação dos valores dos níveis de cinza (NC). Os valores de NC foram obtidos para as faixas "R" (infravermelho próximo), "G" (vermelho) e "B" (parte do azul e todo o verde), utilizando-se

o programa de geoprocessamento TNT Mips 6.6, objetivando um erro mínimo na classificação e mensuração das áreas intra-urbanas e seus componentes (Figura 1).

### **Elaboração de classificação automática supervisionada**

Utilizou-se para a classificação supervisionada das cenas o algoritmo da máxima verossimilhança. Como base geral para classificação supervisionada utilizou-se ortofoto digitalizada dos bairros, fornecida pela Prefeitura de Piracicaba e elaborada pela empresa Base Aerofotogrametria no ano de 2000. Esta ortofoto possui alta qualidade do ponto de vista fotogramétrico e ótima resolução espacial, possibilitando a identificação visual dos alvos intra-urbanos para a confecção dos treinadores e auditores da classificação automática supervisionada. Essa imagem serviu também para a medição da área dos bairros imageados. Para dirimir dúvidas de alguns alvos foram feitas averiguações nos locais imageados para conferência da classificação.

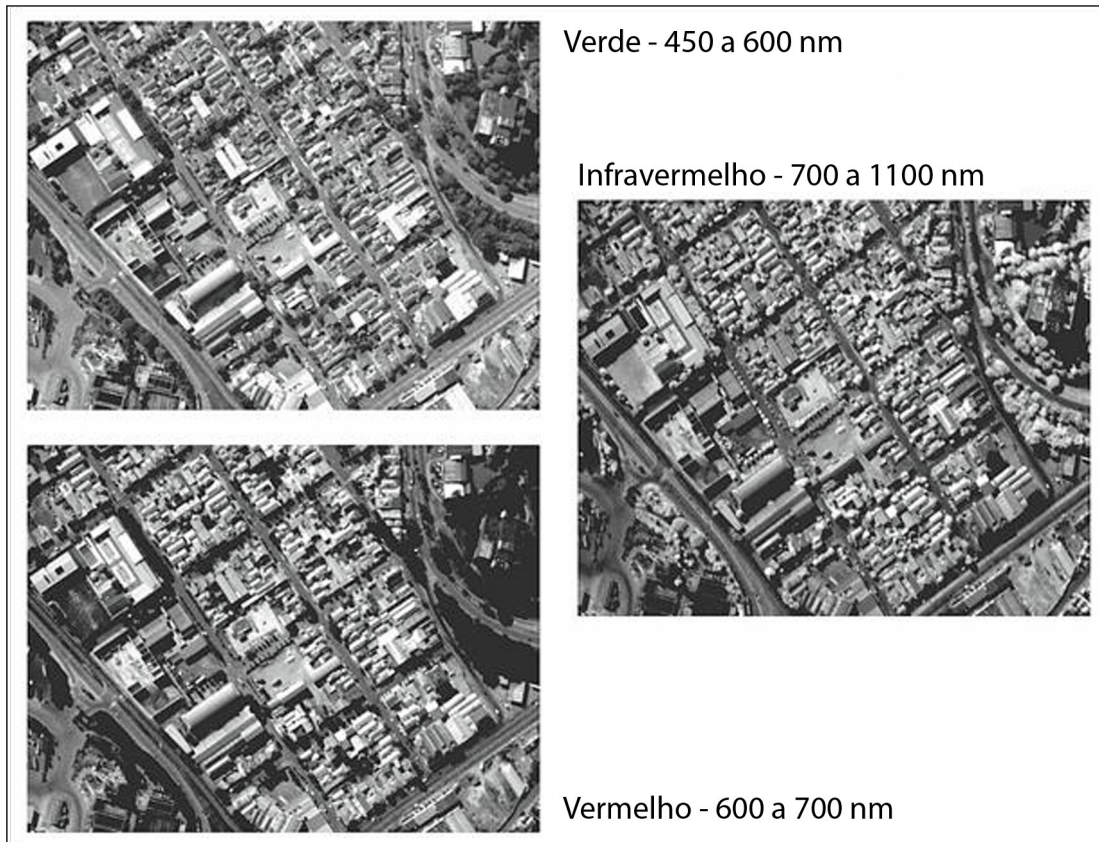
### **Validação estatística**

Para avaliar estatisticamente a exatidão do mapeamento temático utilizou-se a estatística Kappa, obtida pelo programa de geoprocessamento TNT Mips 6.6, conforme descrito em Landis e Koch (1977) e Moreira (2003).

Por meio da construção de uma matriz de erro foi possível utilizar-se de técnicas de análise multivariada para determinar a concordância da classificação (mapeamento temático) com a verdade de campo. Em sensoriamento remoto é muito comum o uso da estatística Kappa para avaliar a concordância entre a verdade terrestre e o mapa temático, obtida por meio da confecção de um segundo treinador chamado auditor, que pode ser obtido a partir da interpretação visual das imagens aéreas multiespectrais e de visitas aos locais imageados (verdade terrestre). A grande vantagem dessa estatística é que no coeficiente Kappa incluem-se todos os elementos da matriz de erro e não somente os elementos da diagonal principal, como no caso da exatidão geral (Congalton, 2001; Moreira, 2003).

Para a determinação do valor Kappa, são empregadas as equações:

$$K = \frac{P_o - P_c}{1 - P_c} \quad (1)$$



**Figura 1**

Imagem do bairro Areião, decomposta em três imagens de bandas espectrais distintas. (Areião's neighborhood image decomposed in three images with different bands).

$$P_o = \frac{\sum_{i=1}^M n_{ii}}{N} \quad (2)$$

$$P_c = \frac{\sum_{i=1}^M n_{i+} n_{+i}}{N^2} \quad (3)$$

sendo  $P_o$  a exatidão geral;  $P_c$ , a proporção de unidades que concordam por casualidade;  $M$ , o número de classes presentes na matriz de erro;  $n_{ij}$ , o número de observações na linha  $i$  e coluna  $j$ ;  $n_{i+}$  e  $n_{+i}$ , os totais marginais da linha  $i$  e da coluna  $j$ , respectivamente; e  $N$ , o número total de unidades amostrais contempladas pela matriz (40).

O valor da estatística Kappa, determinado por meio da equação (1), é comparado em classes

Verde - 450 a 600 nm

Infravermelho - 700 a 1100 nm

Vermelho - 600 a 700 nm

de acurácia sendo que de 80% a 100% a classificação é reconhecida como excelente (Landis e Koch, 1977).

#### **Análise dos dados obtidos**

Para estudar as relações entre as grandezas dos alvos intra-urbanos identificados e mensurados pelos classificadores, utilizaram-se ajustes de curvas de correlação e regressão linear entre as variáveis espaciais encontradas com a densidade populacional de cada bairro, com pessoas com mais de 15 anos de estudo e com chefes de família com renda acima de 20 salários mínimos, obtidos do censo da população (IBGE, 2002; PMP, 2003), admitidos como variáveis independentes. Essas variáveis socioeconômicas foram usadas por Lo e Faber (1997) para identificar e confirmar relações entre índices de qualidade de vida e áreas verdes.

### Proposição de índices

São propostos índices para composição das variáveis obtidas das imagens de videografia.

$$PAI = \frac{ELA}{(ELA + ELI)} \quad (4)$$

em que: PAI = Proporção de Espaço Livre Arborizado (ELA) por Espaço Livre Impermeabilizado (ELI) somando-se ainda o (ELA). O ELA é a somatória de todas as áreas de copa de árvores e arbustos detectadas na videografia, compreendendo o que existe atualmente de cobertura no bairro imageado. O ELI é a totalidade de espaços não construídos, ou seja, livres, contudo impermeabilizados por concreto, asfalto ou outro material. Essa variável mostra a quantidade de espaço não coberto por árvores e que contribui para o aumento do escoamento superficial da água de chuva na cidade. Na fórmula do PAI usa-se a divisão pela soma de ELA e ELI para que o valor esteja limitado entre 0 e 1, sendo 1 o máximo desempenho de um bairro neste índice.

$$PAC = \frac{ELA}{(ELA + EC)} \quad (5)$$

em que: PAC = Proporção de Espaço Livre Arborizado (ELA) por Espaço Construído (EC), somando-se ainda o (ELA). O EC é a somatória de todas as coberturas encontradas na imagem de videografia e quantifica o espaço construído, ou seja, o espaço fechado ou não livre. Tais estruturas urbanas não podem ser ocupadas com vegetação. Assim como o PAI, o PAC só poderá atingir o valor máximo de 1. Pode-se, dessa maneira, por meio de repetidas avaliações das mesmas localidades e comparações com locais onde ocorre excelente equilíbrio entre áreas verdes e espaços construídos, obter-se um valor de desempenho de um determinado bairro.

$$PAV = \frac{ELA}{(ELA + ELH)} \quad (6)$$

em que: PAV = Proporção de Espaço Livre Arborizado (ELA) por Espaço Livre Herbáceo (ELH), somando-se ainda o (ELA) e caracterizando o Espaço Livre Vegetado, que é a cobertura vegetal. O ELH é o somatório de todos os espaços com grama e outras herbáceas quantificados pela imagem de videografia, perfazendo um espaço naturalmente potencial para o plantio de árvores.

O máximo de desempenho nesse índice também será expresso pelo valor 1. Quando o índice for próximo de 1 indicará que os espaços de cobertura vegetal já estão tomados por árvores e arbustos, não havendo mais espaços livres herbáceos para serem ocupados por árvores. Além disso, pode-se visualizar que determinado bairro possui somente cobertura verde nas ruas e avenidas. Isto deverá ocorrer em bairros antigos e altamente ocupados, onde a cobertura vegetal é constituída de árvores e arbustos.

$$IFU = PAI + PAC \quad (7)$$

em que: IFU = Índice de Floresta Urbana

O IFU vai variar em valores entre 0 e 2, sendo um indicador para valorização de espaços arborizados relacionados com os outros constituintes do meio, tais como: ruas, calçadas, quadras, casas e edifícios. Todos esses elementos urbanos estão presentes para a quantificação do desempenho das árvores em “tratar” a cidade, melhorando as condições ambientais para a vida.

Deve-se ressaltar que este “tratamento” ocorre quando as árvores sombreiam superfícies negras, como o asfalto das vias públicas, e proporcionam, entre outras funções, atenuação da temperatura e o impacto das enxurradas por meio da captação da radiação solar e da água das chuvas pelas copas das árvores (Xiao et al., 2000; Akbari et al., 2003).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Exatidão geral das classificações

As imagens, obtidas pela videografia, resultaram em uma resolução espacial de 0,17 m2 no sobrevôo de 1500 metros de altura.

As estatísticas Kappa e exatidão geral obtidas das matrizes de erro das classificações supervisionadas estão contidas na Tabela 1.

Segundo Landis e Koch (1977), essas estatísticas comprovam a exatidão do mapeamento como excelente (80% a 100%). Dados semelhantes foram obtidos por Myeong et al. (2003) ao avaliar a classificação de imagens aéreas de alta resolução espacial na cidade de Syracuse, NY.



Após esta etapa, procedeu-se à ordenação dos bairros segundo uma ordem crescente de densidade populacional, plotando-se em gráfico as ordens quanto a densidade populacional e quantidade relativa de copa arbórea (Figura 2, Tabela 2 e 3).

Nota-se, pela observação dessa figura, uma tendência nas relações de densidade populacional e os valores de arborização e área construída. Estas observações estão em conformidade com o gradiente de floresta urbana no qual à medida que a densidade populacional aumenta, diminui a oferta de vegetação no meio urbano (Bradley, 1995).

Estes dados são comprovados pelos ajustes de correlações e regressões entre variáveis espaciais: espaço construído (EC), espaço livre impermeável (ELI), espaço livre herbáceo (ELH), espaço livre arborizado (ELA) (Figura 3).

Quanto ao espaço livre arborizado, deve-se ressaltar que existe uma sobreposição das copas das árvores nas áreas permeáveis e impermeáveis, em ruas, praças, escolas e quintais, o que deve ser entendido como um espaço já “tratado” pela arborização, onde os efeitos nocivos da exposição desses elementos à radiação estão sendo amenizados pela presença das árvores. A ausência de significância nas correlações entre as variáveis espaço livre impermeável versus espaço livre arborizado e espaço livre herbáceo versus espaço livre arborizado podem estar indicando essa característica ou então, essas variáveis podem estar mostrando que as árvores possuem distribuição não regular e sim caótica nos espaços da cidade (Figura 3).

A ausência de significância nas correlações entre as variáveis espaço livre pavimentado versus espaço livre arborizado e espaço livre vegetado versus espaço livre arborizado indicam essa característica (Figura 2).

Essas observações mostram a estrutura urbana com uma mobilidade espacial específica, quando comparada com áreas rurais. Uma área urbanizada será sempre urbanizada, enquanto uma área rural com pastagem, por exemplo, poderá voltar a ser uma floresta e vice-versa, ou tornar-se definitivamente área urbana.

A correlação negativa entre as variáveis espaço construído versus espaço livre arborizado indica uma tendência natural de acompanhar a densidade popu-

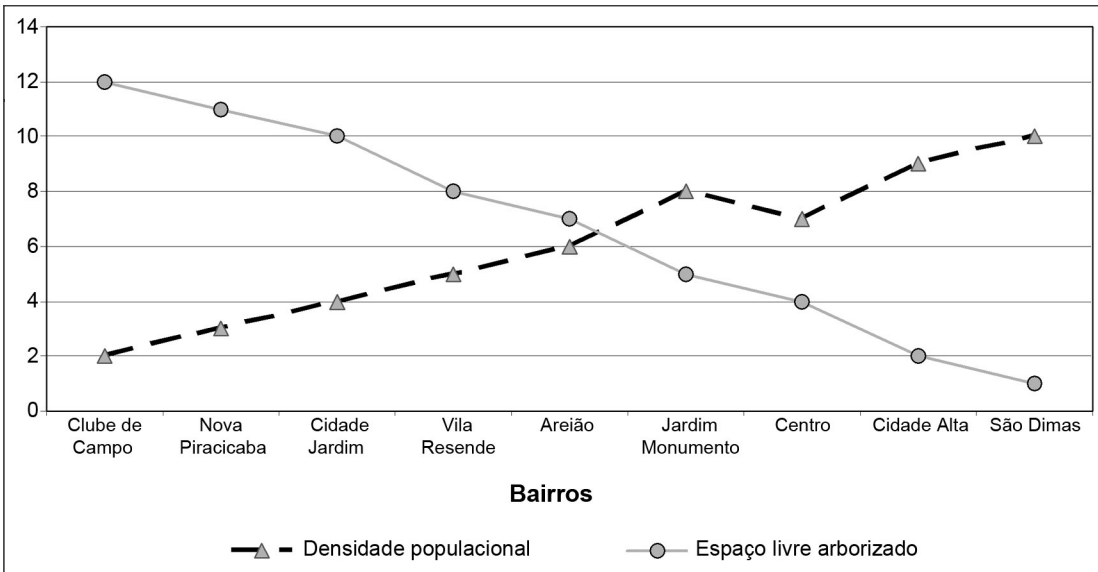
lacional (Figura 3), onde se encontra uma competição maior de equipamentos urbanos pelo espaço quanto maior for a população, confirmando o gradiente de floresta urbana proposto por Bradley (1995).

A principal maneira de modificar ou “encobrir” esses elementos e seus efeitos nocivos ao clima e qualidade de vida urbana é arborizando espaços livres impermeabilizados (Akbari et al., 2003), onde, certamente, as árvores serão mais úteis. Nesse aspecto, a arborização de vias públicas assume importância fundamental onde existe maior potencial ou espaço livre pavimentado para ser “tratado”. Assim, o espaço livre impermeabilizado, composto principalmente de asfalto e de pisos de cimento, em vias públicas, pátios e estacionamentos, obtido pelas imagens de videografia, pode ser entendido como áreas potenciais para receberem arborização. Essa alternativa é ainda mais importante em bairros consolidados e desprovidos de áreas verdes e espaços permeáveis. A quantidade de espaço normalmente fixado para o viário está em torno de 20% da área de cada bairro e, portanto quando um bairro não possui áreas verdes a arborização viária poderá “cobrir” o viário e amenizar essa deficiência em até 20% (Tabela 2).

Observando-se, naquela tabela, diferenças importantes nas proporções de áreas livres pavimentadas entre os bairros imageados, com destaque para os bairros Nova Piracicaba e Jardim Monumento, que, por serem bairros residenciais, podem incrementar a arborização viária, buscando ampliar a cobertura arbórea. Destaca-se também que em bairros onde o espaço construído é grande, São Dimas e Cidade Jardim, a importância, ou valor do verde viário deve ser maior, devendo existir maior cuidado na preservação e ampliação desta arborização. Tais bairros estão localizados na região central da cidade de Piracicaba e, como em Ribeirão Preto, apresentaram baixa cobertura vegetal (Guzzo, 1999).

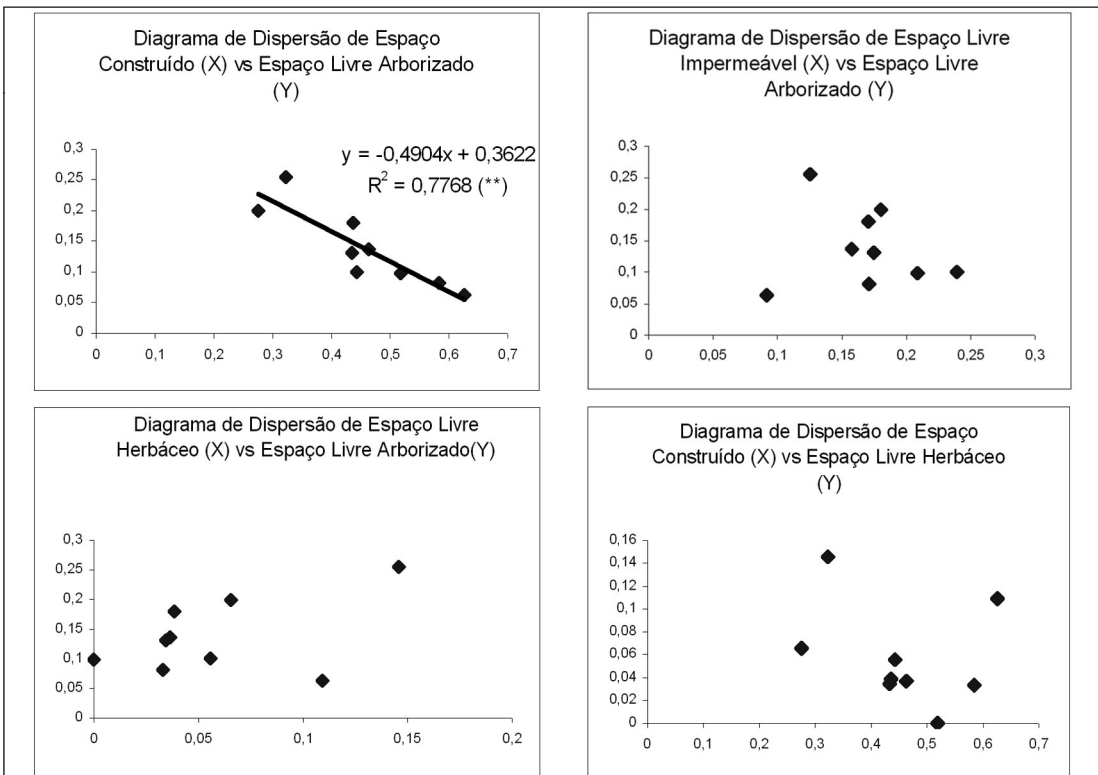
Uma segunda maneira de incrementar a arborização é ampliando a cobertura arbórea em áreas verdes, tanto públicas como privadas (Akbari et al., 2003). Nesse aspecto, os bairros Clube de Campo e São Dimas dispõem de maiores espaços potenciais e possibilidades de intervenções projetuais para incremento da cobertura arbórea em relação aos bairros Cidade Alta e Centro, principalmente (Tabela 2).





**Figura 2**

Gráfico de ordenação (X) de densidade populacional e a presença de árvores nos bairros imageados (Y). (Graphic order(X) from population density and trees in the imaged neighborhoods (Y))



**Figura 3**

Diagramas de dispersão e regressão linear entre variáveis espaciais e densidade populacional, de nove bairros da cidade de Piracicaba, obtidas por meio de videografia e IBGE (2002). Valores em proporções relativas. Asteriscos indicam significância de R2 pelo teste t a 1% (\*\*) e a 5% (\*).

(Dispersion diagrams among spatial urban variables of nine neighborhoods of Piracicaba City by aerial videography and IBGE (2002). Relative proportional values. The marks indicate significant values by t test at 1%(\*\*) and 5%(\*)).

Outra maneira de elevar a quantidade de cobertura arbórea nos bairros de uma cidade é utilizando espaços residuais onde não foi possível construir ou conceber uma área verde ou outro uso, constituindo-se de áreas muito íngremes ou com outra restrição. Esse tópico pode estar incluído em áreas de cobertura de solo, definidas como espaço livre permeável (Akbari et al., 2003). Embora existam terrenos particulares cujo uso limita a ação de arborização, exigindo uma determinação mais acurada sobre seus usos, podem-se indicar áreas com potenciais para este tipo de política projetual, destacando-se os bairros Nova Piracicaba, Jardim Monumento, Areião e São Dimas (Tabela 2).

Além disso, observando a Figura 4, as variáveis espaciais não apresentaram relações com as variáveis sociais: pessoas com mais de 15 anos de estudo e chefes de família com renda superior a 20 salários mínimos. Espera-se que com a ampliação do estudo para os outros 54 bairros da cidade essas correlações aconteçam (Lo e Faber (1997). Apesar de terem ocorrido correlações significativas entre a densidade populacional em relação ao espaço livre arborizado (ELA) e ao espaço construído (EC), e deste último com o ELA (Figura 3), não houve correlação para o espaço livre herbáceo (ELH) e densidade populacional.

Isso pode indicar que existem áreas com gramíneas e outras herbáceas independentemente da pressão exercida pela densidade populacional ou nível socioeconômico nos bairros estudados.

Podem-se inferir diferentes estratégias projetuais traduzidas em políticas públicas diferenciadas para cada unidade avaliada, baseando-se nos resultados obtidos e nos potenciais diferenciados em cada bairro. Os bairros mais densamente construídos e ocupados devem incrementar a arborização em áreas pavimentadas e bairros com menor densidade possuem mais oportunidades para serem “tratados” (Xiao e McPherson, 2003; Akbari et al., 2003).

### A utilização do índice de floresta urbana

Quanto à proposição de quais seriam as melhores variáveis espaciais, para auxiliar na tomada de decisão de manejo do espaço intra-urbano, foram elaborados estudos de correlação e regressão para proposição de índices de qualidade urbanos com enfoque na concepção da floresta urbana como um sistema único constituído por toda a vegetação e arborização urbana (Miller, 1997; Bradley, 1995), Figuras 3 e 4 e Tabela 3.

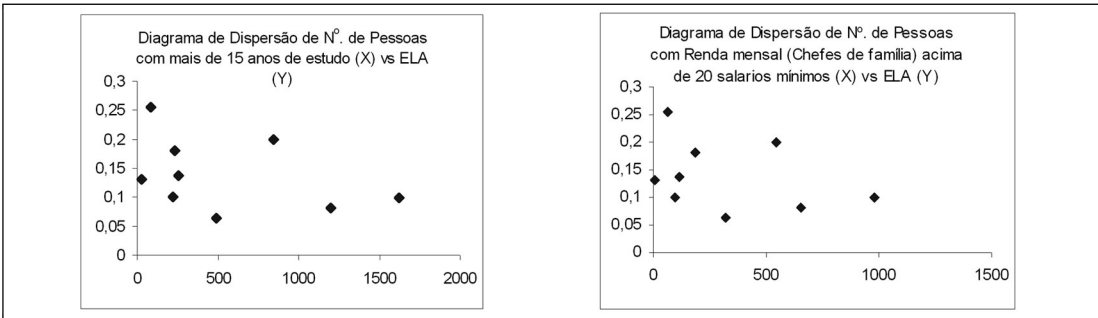
A Figura 5 mostra os resultados de correlações entre os índices propostos para agregarem, em um único valor, as informações sobre a qualidade do espaço intra-urbano (Tabela 3).

**Tabela 3**

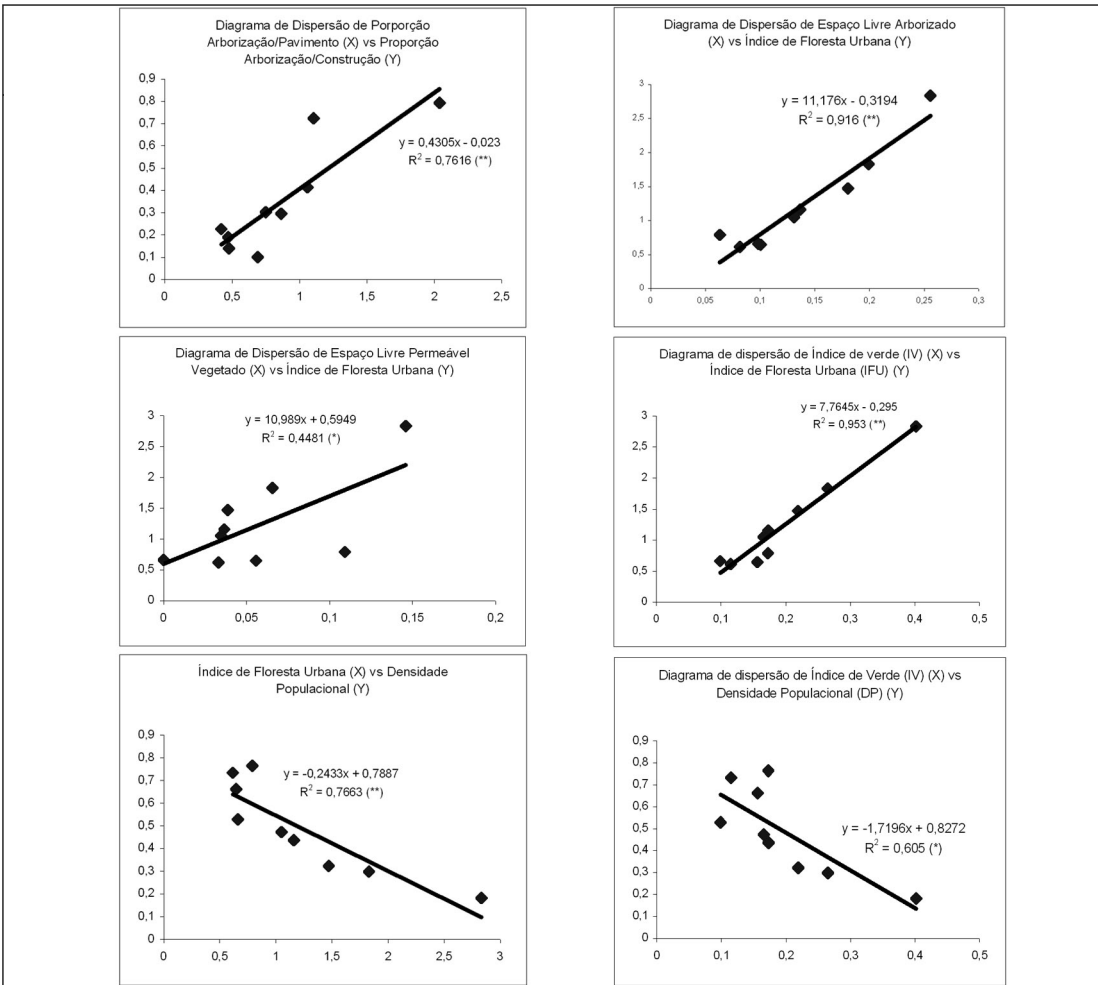
Indicadores de proporcionalidade espaciais e sociais nos bairros imageados. (Social and Spatial proportional indicators in the imaged neighborhoods)

Variáveis espaciais (% e Índices)	Clube de Campo	Nova Piracicaba	Cidade Jardim	Vila Rezende	Areião	Jardim Monumento	Centro	Cidade Alta	São Dimas
ELV	0,40	0,26	0,22	0,17	0,17	0,16	0,10	0,11	0,17
PAC	0,44	0,42	0,29	0,23	0,23	0,18	0,16	0,12	0,09
PAI	0,67	0,53	0,51	0,46	0,43	0,30	0,32	0,32	0,41
PAV	0,64	0,75	0,82	0,79	0,79	0,64	1,00	0,71	0,37
IFU	1,113	0,945	0,807	0,692	0,661	0,481	0,481	0,445	0,500
Densidade Populacional - Nº habitantes/100m <sup>2</sup>	0,18	0,30	0,32	0,44	0,47	0,66	0,53	0,73	0,76
População	743	7691	1431	6460	1768	3513	13195	14075	5205
Área do bairro m <sup>2</sup>	407.803,23	2.572.037,98	442.413,42	1.480.025,80	372.980,04	530.216,93	2.493.006,99	1.916.741,10	680.416,61
Pessoas com mais de 15 anos de estudo	83	847	235	258	28	225	1623	1202	494
Renda mensal - Chefe de Família +20 sal. Min.	63	545	186	115	7	99	980	655	320

ELV – Espaço Livre Vegetado (Herbáceo + Arborizado); PAC - Proporção Arborização por espaço Construído; PAI – Proporção Arborizado por Espaço Livre Impermeável; PAV – Proporção arborizado por Espaço Livre Vegetado; IFU – Índice de Floresta Urbana (PAC + PAI)



**Figura 4**  
 Diagramas de dispersão para relação entre variáveis espaciais e indicadores sociais.  
 (Dispersion diagrams and linear regression among spatial variables and social indicators)



**Figura 5**  
 Diagramas de dispersão e equações de regressão para relações entre índices pertinentes à floresta urbana, obtidos por videografia multiespectral e levantamento censitário em nove bairros da cidade de Piracicaba, SP. Os asteriscos indicam que os valores de R2 são significativos pelo teste t a 1% (\*\*\*) e a 5% (\*).  
 (Dispersion diagrams and regression equations among urban forests indicators by aerial videography and IBGE (2002). Relative proportional values. The marks indicate significant values by t test at 1% (\*\*\*) and 5%(\*)).

Observa-se que não houve correlação para o Índice de Floresta Urbana (IFU) e a variável espaço livre herbáceo (ELH), e correlação negativa quando relacionado com a densidade populacional. As correlações restantes nessa figura são esperadas e naturais, já que as variáveis correlacionadas são constituintes dos índices, mostrando que o Índice de Floresta Urbana (IFU) foi eficiente em agregar as variáveis eleitas como importantes para avaliação da floresta urbana (Figura 5).

Os índices de proporcionalidade PAC e PAI, constituintes do Índice de Floresta Urbana, expressam a relação da arborização com o espaço construído, impermeabilizado, respectivamente. Toma-se como exemplo o bairro São Dimas, que possui a pior cobertura arbórea (6,33%), mas como foram encontrados poucos espaços livres impermeáveis (9,17%) e a mais alta porcentagem de espaços construídos (62,56%), pode-se com uso desses indicadores, visualizar a possibilidade de sua arborização estar localizada junto ao asfalto e calçadas das vias públicas.

O PAI valorizou esta possibilidade proporcionando ao bairro São Dimas um Índice de Floresta Urbana superior aos bairros Jardim Monumento, Centro e Cidade Alta, valorizando a cobertura arbórea dos elementos mais impactantes ao meio urbano, como o asfalto e demais pavimentos (Tabela 3).

A imagem do bairro Centro obteve índice PAV com valor 1 indicando não ser possível ampliar mais o espaço arbóreo em áreas permeáveis, restando espaços intra-quadras e os espaços livres impermeáveis, como as vias públicas, para serem arborizados. Esse bairro possui características de alta densidade de edificações e cobertura vegetal composta somente de árvores (Tabela 3).

Deve-se procurar compatibilizar equipamentos urbanos presentes nas vias públicas como placas de sinalização, iluminação e redes de energia elétrica para proporcionar espaço para que se possa efetuar a introdução de árvores. Tais árvores devem ter porte suficiente para estabelecer uma nova cobertura verde sobre as áreas densamente edificadas da cidade de Piracicaba, SP.

Destacam-se positivamente os bairros Clube de Campo, Nova Piracicaba e Cidade Jardim, por apresentarem valores de Espaço Livre Vegetado próximos do ideal preconizado por Lombardo (1985) que é de 30% da área urbanizada coberta por vegetação arbórea, arbustiva ou herbácea. Tal proporção é indicada para que se obtenham adequadas condições climáticas e de qualidade de vida.

Pela quantificação do espaço livre vegetado de todos os bairros videografados, pode-se indicar, por meio da observação da variação do IFU nos nove bairros, os valores próximos ou superiores a 1 como indicadores de boa qualidade de floresta urbana (Tabela 3).

## CONCLUSÃO

Por meio dos métodos usados e resultados encontrados é possível afirmar que:

- As imagens provenientes de videografia multiespectral de alta resolução são indicadas para obtenção de dados para análise do verde urbano e suas relações com os demais componentes do espaço das cidades;
- O Índice de Floresta Urbana, assim como seus componentes, podem ser usados para reconhecimento da qualidade do espaço urbano;
- Apesar de existirem áreas públicas para plantio de árvores e outras formas de vegetação, a arborização urbana nos bairros imageados está associada à quantidade de área edificada e sua densidade populacional, e não, ao nível socioeconômico da população local;
- Os dados indicam que os bairros Cidade Alta e Centro são prioritários para execução de políticas públicas, objetivando aumentar a arborização e amenizar os efeitos nocivos de sua ausência, especialmente para o microclima dessas localidades.

## AUTORES E AGRADECIMENTOS

DEMÓSTENES FERREIRA DA SILVA FILHO é Doutor em Agronomia pelo Programa de Pós-graduação da FCAV/UNESP e Professor Doutor do Departamento de Ciências Florestais - ESALQ/USP - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13400-970 - E-mail: dfsilva@esalq.usp.br

KATHIA FERNANDES LOPES PIVETTA é Professora Assistente Doutora do Departamento de Produção Vegetal da FCAV/UNESP - Rod. Carlos Tonanni, Km 05 - s/n - Jaboticabal, SP - 14870-000 - E-mail: kathia@fcav.unesp.br

HILTON THADEU ZARATE DO COUTO é Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13400-970 - E-mail: htzcouto@esalq.usp.br

JEFFERSON LORDELLO POLIZEL é analista de sistemas, Funcionário do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13400-970 - E-mail: jpolize@esalq.usp.br

Os autores agradecem aos Professores Fernando Seixas, José Otávio Brito, Antônio Natal Gonçalves, Fábio Poggiani, Gerd Sparovek e Ana Maria Liner Pereira Lima da ESALQ/USP e à Profa. Maria Esmeralda Soares Payão Demattê da FCAV/UNESP pelo auxílio conceitual, logístico, correções e ensinamentos que resultaram neste trabalho.

Especial agradecimento ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - IPEF e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo auxílio financeiro para a realização desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKBARI, H.; ROSE, L.S.; TAHA, H. Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos. **Landscape and urban planning**, v.63, p.1-14, 2003.
- BAKER, L.A.; BRAZEL, A.J.; SELOVER, N.; MARTIN, C.; MCINTYRE, N.; STEINER, F.R.; NELSON, A.; MUSA-CACHIO, L. Urbanization and warming of Phoenix (Arizona, USA): impacts, feedbacks and mitigation. **Urban ecosystems**, v.6, p.183-203, 2003.
- BRADLEY, G.A., ed. Urban forest Landscapes: integrating multidisciplinary perspectives. Seattle: University of Washington Press, 1995. p. 03-11
- CONGALTON, R.G. Accuracy assessment and validation of remotely sensed and other spatial information. **International journal of wildland fire**, v.10, p.321-328, 2001.
- COUTO, H.T.Z.; VETORAZZI, C.A.; FERRAZ, S.F.B.; POMPERMAYER NETO, P. Airborne videography as a data source for decision making process in agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2, Lake Buena Vista, 2000. **Proceedings**. Lake Buena Vista: ERIM, 2000. p.459-461
- DUNCAN, D. **Configuration of remote sensing systems based on Duncan Tech Multispectral Cameras**. Auburn: DuncanTech, 2000. 7p. Disponível em: <<http://www.duncantech.com>>. Acesso em: 8 dez. 2002)
- GUZZO, P. **Estudo dos espaços livres de uso público da cidade de Ribeirão Preto, SP, com detalhamento da cobertura vegetal e áreas verdes públicas de dois setores urbanos**. Rio Claro, 1999. 125p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **STATCART: base de informações por setor censitário, Piracicaba, SP – Censo Demográfico 2000**. Rio de Janeiro, 2002. 1 CD-ROM.
- LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v.33, n.1, p.159-174, 1977.
- LO, C.P.; FABER, B.J. Integration of Landsat thematic mapper and census data for quality of life assessment. **Remote sensing of environment**, v.62, p.143-157, 1997.
- LOMBARDO, M.A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985. 244p.
- MACEDO, S.S. Espaços livres. **Paisagem e ambiente: ensaios**, n.7, p.15-56, 1995.
- MILANO, M.S.; DALCIN, E.C. **Arborização de vias públicas**. Rio de Janeiro: Light, 2000. 226p.
- MILLER, R.W. **Urban forestry: planning and managing urban green spaces**. 2.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1997. 502p.
- MOREIRA, M.A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2.ed. Viçosa: UFV, 2003. 307p.
- MYEONG, S.; NOWAK, D.J.; HOPKINS, P.F.; BROCK, R.H. Urban cover mapping using digital, high-spatial resolution aerial imagery. **Urban ecosystems**, v.5, p.243-256, 2003.
- PAES, F.C.; PINTO, S.A.F.; DUTRA, L.V. Um estudo exploratório para obtenção de índices de qualidade de vida urbana (IQV) utilizando imagens de alta resolução do satélite IKONOS II. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, Belo Horizonte, 2003. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p.1907-1914
- POMPERMAYER NETO, P. **Utilização da videografia na detecção de áreas com deficiências nutricionais em plantios de eucalipto**. Piracicaba, 2002. 75p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo
- POMPERMAYER NETO, P.; COUTO, H.T.Z. Utilização de imagens de videografia aérea na detecção de deficiências nutricionais em plantios de eucalipto. **Scientia forestalis**, n.63, p.23-31, 2003.
- PMP – PREFEITURA MUNICIPAL DE PIRACICABA. **Mapa da inclusão / exclusão social**. Piracicaba: Secretaria Municipal de Desenvolvimento Social, 2003. 113p.
- SACAMANO, P.L.; MCPHERSON, E.G.; MYHRE, J.; STANKOVICH, M.; WEIH, R.C. Describing urban forest cover: an evaluation of airborne videography. **Journal of forestry**. v.93, p.43-48, 1995.
- XIAO, Q.; MCPHERSON, E.G. Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest. **Urban ecosystems**, v.6, p.291-302, 2003.
- XIAO, Q.; MCPHERSON, E.G.; USTIN, S.L.; GRISMER, M.E.; SIMPSON, J.R. Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California. **Hydrological processes**, v.14, p.763-784, 2000.